

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет будівництва та транспорту**  
**Кафедра будівельних конструкцій**

**До захисту**  
**Допускається**  
Завідувач кафедри  
Будівельних конструкцій

\_\_\_\_\_  
/...../

підпис

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**за другим рівнем вищої освіти**

На тему: **«Робота структурної просторової плити під навантаженням»**

Виконав (ла)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Слухаєвський Б.Г.

\_\_\_\_\_  
(Прізвище, ініціали)

Група

(Науковий)

керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Срібняк Н.М.

\_\_\_\_\_  
(Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра: будівельних конструкцій

Спеціальність: 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

**ЗАВДАННЯ**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

**Слухаєвський Богдан Григорович**

**Тема роботи:** Робота структурної просторової плити під навантаженням

Затверджено наказом по університету № 34/ос від "07" 01 2025р.

Строк здачі студентом закінченої роботи: "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025 р.

Вихідні дані до роботи:

---

*Дослідити, як впливає зміна базового формоутворюючого структуру стержньової просторової плити елементу на напружено-деформований стан конструкції та її матеріалоемність.*

---

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

*Провести огляд наукових джерел, присвячених розвитку просторових стержньових плит, висвітливши еволюцію їхніх конструктивних схем, підходів до формоутворення та принципів оптимізації, а також сучасні тенденції використання параметричного моделювання й числових методів аналізу. Виконати розрахунки трьох моделей структурних плит із різною формою базового елемента, сформулювати мету та завдання дослідження; провести числовий експеримент з аналізу напружено-деформованого стану та оптимізаційного підбору перерізів; проаналізувати результати обчислень і подати узагальнені висновки.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

*Мультимедійна презентація в форматі Microsoft PowerPoint*

**Керівник :**

(підпис)

Н.М. Срібняк

(Прізвище, ініціали)

**Консультант**

(підпис)

Н.М. Срібняк

(Прізвище, ініціали)

**Завдання прийняв до виконання:**

**Здобувач**

(підпис)

Б.Г. Слухаєвський

(Прізвище, ініціали)

## Анотація

**Слухасєвський Богдан Григорович. Робота структурної просторової плити під навантаженням** – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

**Кваліфікаційна робота магістра** за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляду досліджень за темою, яку обрано, розділів основної частини, висновків за результатами досліджень та формулювань висновків із досліджень (українською та англійською мовами).

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

### **Результати досліджень дозволяють:**

- Отримати глибоке розуміння принципів побудови та роботи основних типів просторових стрижневих плит, а також визначити ключові чинники, що впливають на їхній напружено-деформований стан.
- Провести числовий статичний аналіз та конструктивний розрахунок різних варіантів просторових стрижневих плит із використанням програмного комплексу ЛІРА-САПР, що забезпечує надійність отриманих результатів.
- Визначити розподіл внутрішніх зусиль, характер деформацій, переміщення вузлів та рівень загальної просторової стійкості, а також оцінити ступінь використання жорсткісних характеристик перерізів стержнів у різних конструктивних моделях.

- Виконати оптимізаційний підбір перерізів елементів з урахуванням нормативних вимог, здійснити порівняльний аналіз ваги всіх конструктивних рішень та обґрунтовано вибрати варіант з найменшими витратами сталі.

**Аналіз публікацій та досліджень** встановив, що структурні покриття на основі просторових стержневих плит є універсальними, легкими та ефективними конструктивними системами для великопрольотних будівель. Металеві ґратчасті системи, особливо з трубчастими профілями, поєднують архітектурну виразність із високою несучою здатністю. Ефективність плит залежить від конструктивних параметрів, типу сітки (квадратна, трикутна або змішана) та способу обпирання на опори. Оптимальні схеми спирання забезпечують рівномірний розподіл внутрішніх зусиль, зменшують прогини та підвищують просторову стійкість. Дослідження вузлів показують, що зварні, болтові та комбіновані з'єднання (зокрема система MERO) надійно сприймають осьові зусилля, проте можуть бути вразливі до згинальних напружень. Раціональні схеми обпирання плит і діагональна орієнтація сітки дозволяють знизити зусилля в поясах, зменшити прогин і забезпечити економне використання матеріалів.

В основній частині В основній частині роботи досліджується оптимізація конструктивного рішення структурної металевої стержневої плити покриття розміром 36 × 24 м. Розглядаються три варіанти плит, які відрізняються лише кількістю та розташуванням опорних колон при однакових геометричних параметрах і фізико-механічних характеристиках матеріалу. Основна увага приділяється аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, оцінці внутрішніх зусиль, переміщень вузлів та загальної просторової стійкості, а також ступеню використання перерізів стержнів. За допомогою ПК Ліра-САПР 2024 виконуються числові розрахунки, підбір оптимальних перерізів у модулі «Метал», оцінка ваги кожного конструктивного варіанту та обґрунтований вибір

моделі з мінімальною матеріалоемністю. Результати дозволяють практично визначити ефективні конструктивні рішення та підвищити економічність металевих покриттів.

У **висновках** встановлено, що просторові стержньові плити є високоефективними перекриттями для великих прольотів, проте їхній напружено-деформований стан дуже чутливий до зміни конструктивних параметрів — товщини плити, форми елементів та схеми обпирання. Збільшення кількості опор рівномірно знижує осьові сили та моменти в поясах, розкосах і колонах, покращує жорсткість і просторову стійкість конструкції. Схема з периметральними опорами (схема №3) виявилася найжорсткішою, найстійкішою та найбільш економічною за вагою, забезпечуючи рівномірний розподіл напружень і мінімальну матеріалоемність, тоді як схема з чотирма опорами (схема №1) є найслабшою і найбільш матеріалоемною. Таким чином, оптимальним конструктивним варіантом плити є модель із периметральним спиранням на колони.

**Ключові слова:** матеріалоемність, структурна плита покриття, стержньова просторова плита, ефективність

**Список публікацій** та/або виступів на конференціях студента:

- 1.Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. Стержньові структурні плити-ефективні сучасні конструкції покриття // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.С235
2. Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. Сучасні підходи до проектування покриттів із використанням стержньових плит. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.С.236

В **додатках** наведено: тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

**Структура роботи.** Робота складається з основного тексту на 64 сторінках, у тому числі 15 таблиць, 59 рисунків. Текст роботи містить 6 розділів, що включають загальну характеристику роботи й висновки, список з 32 джерел, 2 додатків на 42 сторінках. Графічна частина складається з 37 слайдів мультимедійної презентації.

### **Abstract**

**Slukhayeivskyi Bohdan Hryhorovych. Behavior of a Spatial Structural Slab under Load** – Master’s Qualification Thesis (Manuscript). Master’s Qualification Thesis in the specialty 192 “Construction and Civil Engineering”. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The **work consists of** a table of contents, a general description of the study and its qualification features, a review of research on the chosen topic, chapters of the main part, conclusions based on the research results, and formulations of findings (in Ukrainian and English). The goal, objectives, object, and subject of the research, as well as the methods of scientific investigation, have been formulated.

#### **The research results allow:**

- To gain a deep understanding of the principles of design and operation of the main types of spatial structural slabs, and to identify key factors affecting their stress-strain state.
- To perform numerical static analysis and structural calculations of different variants of spatial structural slabs using the LIRA-SAPR software package, ensuring the reliability of the obtained results.
- To determine the distribution of internal forces, the nature of deformations, nodal displacements, and the level of overall spatial stability, as well as to assess the degree

of utilization of stiffness characteristics of member cross-sections in different structural models.

- To carry out an optimization of cross-sections of elements according to regulatory requirements, perform a comparative analysis of the weight of all design solutions, and reasonably select the variant with the minimum steel consumption.

The **analysis of publications** and research has established that structural coverings based on spatial structural slabs are universal, lightweight, and efficient systems for large-span buildings. Metal lattice systems, especially with tubular profiles, combine architectural expressiveness with high load-bearing capacity. The efficiency of slabs depends on design parameters, the type of grid (square, triangular, or mixed), and the method of support on columns. Optimal support schemes provide uniform distribution of internal forces, reduce deflections, and enhance spatial stability. Studies of joints show that welded, bolted, and combined connections (including the MERO system) reliably bear axial forces but can be vulnerable to bending stresses. Rational support schemes and diagonal grid orientation reduce forces in chords, decrease deflection, and ensure economical material use.

In the **main part** of the work, the optimization of the design solution of a structural metal spatial slab covering measuring  $36 \times 24$  m is investigated. Three slab variants are considered, differing only in the number and arrangement of supporting columns while maintaining identical geometric parameters and material properties. The main focus is on analyzing the stress-strain state, evaluating internal forces, nodal displacements, and overall spatial stability, as well as the degree of utilization of member cross-sections. Numerical calculations are performed in LIRA-SAPR 2024, optimal cross-sections are selected in the “Metal” module, the weight of each design variant is evaluated, and the model with minimum material consumption is justified. The results allow the practical determination of effective structural solutions and improvement of the economic efficiency of metal coverings.

The conclusions indicate that spatial structural slabs are highly efficient for large spans, but their stress-strain state is very sensitive to changes in design parameters such as slab thickness, element geometry, and support scheme. Increasing the number of supports uniformly reduces axial forces and moments in chords, braces, and columns, enhancing stiffness and spatial stability. The perimeter-supported scheme (Scheme No. 3) proved to be the stiffest, most stable, and most economical in weight, providing uniform stress distribution and minimal material consumption, whereas the four-support scheme (Scheme No. 1) is the weakest and most material-intensive. Thus, the optimal structural variant is the model with perimeter support on columns.

**Keywords:** material consumption, structural covering slab, spatial structural slab, efficiency

**List of student publications and/or conference presentations:**

1. Slukhayevskiy B.H., Sribnyak N.M. Rod Structural Slabs – Efficient Modern Covering Systems // Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference of Students and Postgraduates dedicated to International Students' Day (November 17–21, 2025) – Sumy, 2025. P. 235
2. Slukhayevskiy B.H., Sribnyak N.M. Modern Approaches to Designing Coverings Using Structural Slabs // Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference of Students and Postgraduates dedicated to International Students' Day (November 17–21, 2025) – Sumy, 2025. P. 236

The **appendices** include conference abstracts and an album of slides of the multimedia presentation.

**Structure of the work:** The thesis consists of the main text of 64 pages, including 15 tables and 59 figures. The text contains six chapters, including a general description and conclusions, a list of 32 references, and two appendices totaling 42 pages. The graphical part consists of 37 slides of a multimedia presentation.

## ЗМІСТ

**Завдання**

**Анотація**

**РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИКА РОБОТИ .....11**

1.1. Актуальність застосування структурних просторових стержньових багатопрольотних плит покриття..... 11

1.2 Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження..... 12

**РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ..... 14**

2.1. Основна інформація про структурні покриття..... 14

2.1.1 Типологія та способи спирання структурних плит ..... 15

2.1.2 Класифікація та архітектурно-конструктивні особливості..... 16

2.1.3 Принципи роботи структурних покриттів..... .. 17

2.1.4 Матеріали та сучасні підходи до формоутворення.....17

2.1.5 Приклади застосування .....18

**РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ..... 19**

**РОЗДІЛ 4. ЧИСЛОВІ МОДЕЛІ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ, ЩО Є ПРЕДМЕТОМ ДОСЛІДЖЕННЯ**

4.1. Обґрунтування прийнятого об'ємно-планувального рішення конструкції структурної плити, що досліджується.....21

4.2. Форма базового структуроутворюючого елемента.....26

4.3. Скінченоелементні моделі просторової плити, що досліджується..... 29

4.4 Параметри жорсткості перерізів та характеристики матеріалів, що прийнято. Граничні умови..... 33

4.5 Навантаження на скінченоелементні моделі.....34

**РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**

**СТРУКТУРНОГО ПОКРИТТЯ**

5.1. Зусилля в стержнях структури.....38

5.2. Характер деформацій у моделях плит, що аналізуються..... 47

5.4 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються.....50

5.5	Аналіз використання несучої здатності перерізів стержнів при початкових жорсткісних характеристиках, що задані у вихідних даних.....	53
5.6	Висновки з аналізу ступеня використання перерізів стержнів з урахуванням початково заданих жорсткісних характеристик за першою групою граничних станів.....	57
5.7	Ступінь використання перерізів при розрахунках на жорсткість (за 2 групою граничних станів).....	58
5.8	Висновки з аналізу ступеня використання перерізів стержнів з урахуванням початково заданих жорсткісних характеристик за другою групою граничних станів .....	62
5.9	Підбір нових профілів в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР.....	64
5.10	Аналіз впливу форми базового елемента впливає на вагу конструктивних груп елементів.....	69
<b>РОЗДІЛ 6. ВИСНОВКИ .....</b>		<b>72</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>		<b>75</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>		<b>78</b>
Додаток 1. Тези доповіді на конференції		
Додаток 2. Графічний матеріал (презентація)		

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

#### 1.1 Актуальність застосування структурних просторових стержньових багатопрольотних плит покриття

У сучасній архітектурі та будівельній інженерії все більшої актуальності набуває застосування структурних великопрольотних плит покриття як ефективних, універсальних та економічно доцільних конструктивних систем. Їх використання зумовлене тенденціями до створення відкритих, трансформованих просторів без проміжних опор, що є особливо важливим для громадських, спортивних, виставкових, торговельних і транспортних об'єктів. Саме такі конструкції дозволяють перекривати значні прольоти при мінімальній вазі та високій просторовій жорсткості.

Структурні просторові стержньові плити формуються шляхом багаторазового повторення базового елемента – так званого «кристалу», що надає конструкції регулярну кристалічну будову, подібну до просторової організації атомів у графіті чи алмазі. Завдяки цьому досягається рівномірний розподіл зусиль у стержнях, підвищується загальна несуча здатність та забезпечується висока надійність системи. Така геометрична впорядкованість також відкриває широкі можливості для архітектурної формотворчості, оскільки конструкція стає не лише інженерним елементом, а й важливим складником архітектурного образу будівлі.

Важливою перевагою структурних плит є їх формоутворювальна гнучкість. Вони можуть виконуватися як у плоскому, так і в криволінійному варіанті – сферичному, циліндричному, гіперболічному або комбінованому. Це дозволяє адаптувати такі системи до різних архітектурних концепцій, кліматичних умов і функціональних вимог. Криволінійні просторові плити, зокрема, демонструють підвищену жорсткість і стійкість, що робить їх особливо ефективними для перекриття надвеликих прольотів.

Для виготовлення просторових стержньових плит застосовують різноманітні матеріали – сталь, алюміній, клеєну деревину, а також комбіновані рішення. Вибір матеріалу залежить від умов експлуатації, вимог до довговічності, вагових обмежень та архітектурного задуму. В Україні найбільш поширеними залишаються армоцементні елементи регулярної структури, які поєднують достатню міцність, відносну дешевизну та технологічну доступність. Водночас сучасні тенденції все більше орієнтовані на використання легких металевих та композитних систем, що зменшують навантаження на несучі конструкції та фундаменти.

Окремої уваги заслуговує архітектурно-художній потенціал просторових структур. Завдяки гратчастій природі вони дозволяють формувати світлопрозорі або напівпрозорі покриття, інтегрувати природне освітлення вглиб будівлі, створювати складні світлотіньові ефекти та підсилювати емоційне сприйняття простору. У поєднанні з перфорованими ділянками, світловими ліхтарями чи центральними атріумами такі конструкції перетворюються на ключовий елемент архітектурної композиції.

Таким чином, актуальність структурних просторових стержньових багатопрольотних плит покриття зумовлена їх високою конструктивною ефективністю, економічністю, універсальністю застосування, а також значним архітектурно-образним потенціалом. У сучасних умовах сталого розвитку, оптимізації ресурсів і пошуку виразних архітектурних рішень ці системи стають одним із найперспективніших напрямів у проектуванні великопрольотних будівель і споруд.

## **1.2 Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження**

**Метою** виконання дослідної роботи є проведення числових досліджень щодо виявлення напружено-деформованого стану та підбору нових перерізів для усіх конструктивних груп стержнів скінченоелементних моделей структурної плити, структура яких різниться лише формою базового елемента.

Щоб досягти поставленої мети, необхідно виконати такі **задачі**:

1. Дослідити принципи побудови та роботу основних типів просторових стрижневих плит і проаналізувати ключові чинники, що визначають їхній напружено-деформований стан.
2. Виконати числовим способом статичний аналіз та конструктивний розрахунок варіантів просторової стержньової плит в ПК Ліра-САПР.
3. Провести комплексний аналіз роботи розрахункових моделей, визначивши розподіл внутрішніх зусиль, характер деформацій, переміщення вузлів, рівень загальної просторової стійкості, а також фактичний ступінь використання жорсткісних характеристик призначених перерізів стержнів.
4. Здійснити оптимізаційний підбір перерізів елементів в модулі «Метал» програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024 відповідно до чинних нормативних вимог [9], з подальшим порівняльним аналізом ваги всіх конструктивних рішень та обґрунтованим вибором варіанту з найменшими витратами сталі.

**Об'єкт дослідження** – просторові стержньові структурні покриття з габаритами в плані  $36,0 \times 36,0$  м мають ідентичні фізико-механічні характеристики матеріалів та однакову загальну геометрію, відрізняючись між собою виключно конфігурацією базового модуля – кристалічного елемента.

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан скінченоелементних моделей просторових стержньових плит, їх конструктивне вирішення, матеріалоемність трьох моделей стержньових просторових плит.

#### **Практичне значення отриманих результатів**

Отримані результати є результатами оптимізаційного розрахунку за одним лише критерієм, який суттєво може впливати на матеріалоемність конструкції.

#### **Апробація та публікація результатів роботи**

Підсумки дослідження оприлюднено в збірнику тез щорічної студентсько-викладацької конференції СНАУ (17–21 листопада 2025 р.).

1.Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. Стержньові структурні плити-ефективні сучасні конструкції покриття // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.С235

2. Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. Сучасні підходи до проектування покриттів із використанням стержньових плит. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.С.236

## РОЗДІЛ 2

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

#### 2.1 Основна інформація про структурні покриття

Структурні покриття є просторовими конструктивними системами, у яких силова робота формується завдяки взаємодії стержневих, панельних або комбінованих елементів, об'єднаних у геометрично стабільну тривимірну структуру. Основною характеристикою таких покриттів є здатність ефективно сприймати та перерозподіляти зовнішні навантаження, забезпечуючи значний проліт без внутрішніх проміжних опор. Завдяки цьому структурні покриття широко застосовуються у великих громадських, промислових та спортивних будівлях — виставкових центрах, вокзалах, ангарах, стадіонах.

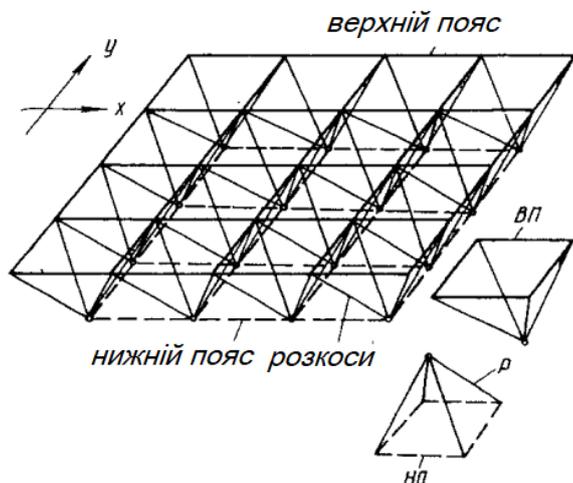


Рис. 2.1 Дворядна система нахилених перехресних ферм, яку використовують для моделювання структурної плити

### 2.1.1 Типологія та способи спирання структурних плит

Просторові структурні системи можуть працювати як за визначеними, так і за невизначеними з точки зору статички опорними схемами. При цьому для забезпечення статичної визначеності конструкції з квадратною сіткою необхідно передбачати опирання в чотирьох вузлах, тоді як для трикутної конфігурації достатньо трьох опор; у протилежному випадку система переходить у категорію статично невизначуваних [5].

На рис. наведено конструктивні схеми стержньових плит з квадратними поясними сітками та з трикутними поясними сітками (рис.2.1-2.2).

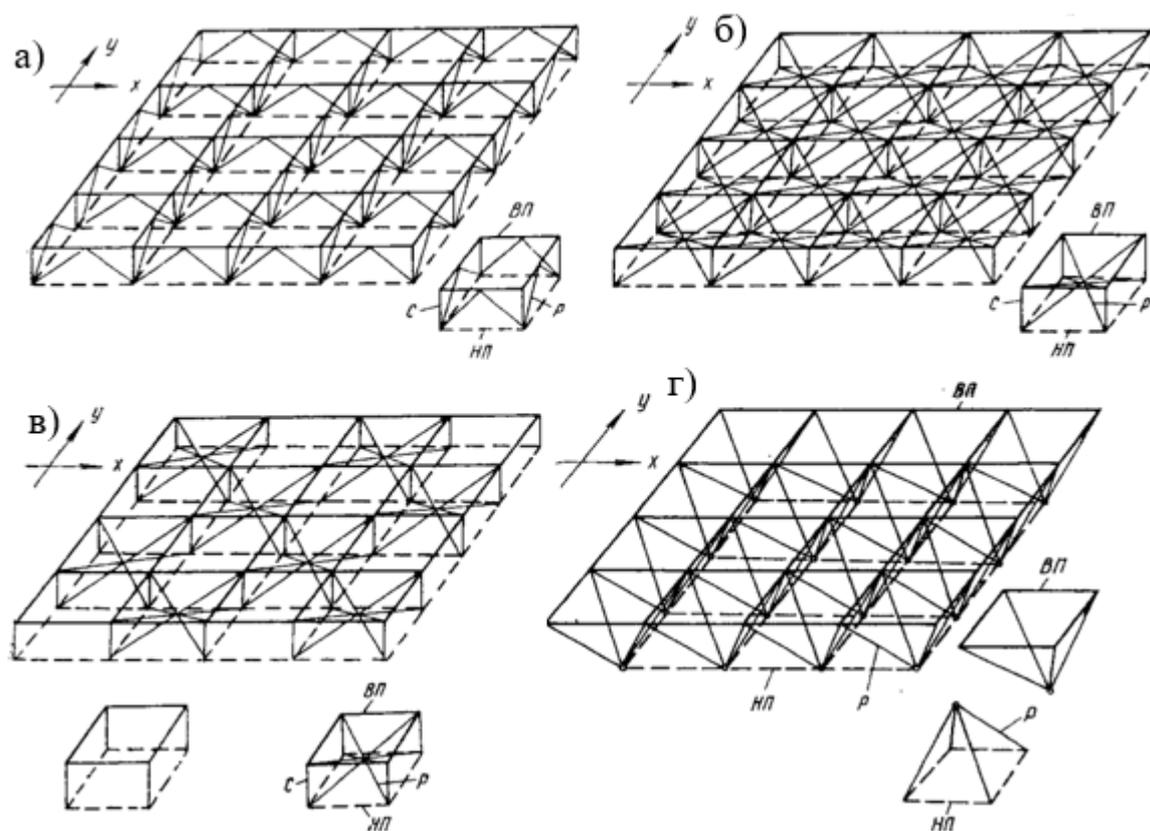


Рис.2.2 Стрижневі плити з поясними сітками з квадратних ячеек: а – типу вертикальних перехресних ферм двох напрямків; б, в – з розташуванням розкосів поза площиною ферм, г– типу похилих перехресних ферм двох напрямків; д–те ж саме, з вдвічі розрідженою нижньою поясною сіткою. ВП, НП – верхні і нижні пояси; Р – розкоси; С – стійки

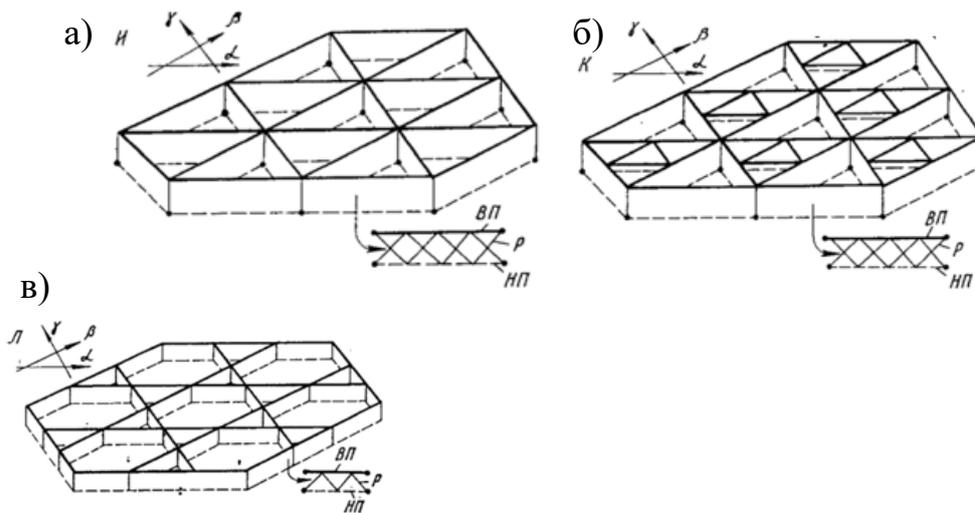


Рис. 2.3 Стрижньові плити, утворені перетинанням вертикальних ферм трьох напрямків: з поясними сітками з трикутних комірок-а; з шаховим розташуванням зв'язків в комірках верхньої поясної сітки-б; з утворенням поясних сіток з поєднання трикутних і шестикутних комірок-в [5].

### 2.1.2 Класифікація та архітектурно-конструктивні особливості

У світовій практиці структурні покриття поділяються на кілька основних типів залежно від принципу формоутворення та передачі зусиль:

Просторові (тривимірні) ферми – традиційно використовуються у покриттях великих прольотів. Вони формуються шляхом поєднання стрижнів у модульні осередки — трикутні або багатокутні комірки, які забезпечують геометричну незмінність і високу жорсткість. Їх детально описано в класичних працях з аналізу та проектування просторових рамових систем [1].

Структурні оболонки – тонкі криволінійні поверхні (купольні, склепінчасті, гіперболоїдні), що працюють переважно за мембранною схемою. Вони вирізняються мінімальними матеріальними затратами та високою несучою здатністю завдяки роботі за рахунок кривини. Прикладами є куполи зі сталевих або залізобетонних панелей, сітчасті оболонки та гратчасті куполи [2].

Сітчасто-стержневі покриття – складаються з регулярно повторюваних модулів, що формують рівномірну просторову решітку. Вони поєднують

ферменну та оболонкову роботу та дозволяють створювати складні криволінійні форми за рахунок модульної варіативності.

Тензоструктури – системи, де основну роль відіграють розтягнуті елементи: кабелі, канати, мембрани. Для таких конструкцій характерна мінімальна маса при значних прольотах, але вони потребують спеціальної форми та попереднього напруження для забезпечення стійкості.

### **2.1.3 Принципи роботи структурних покриттів**

Ключовим елементом ефективності структурних покриттів є спрямування зусиль по найкоротших силових шляхах та формування конструкції, в якій домінує робота на розтяг і стиск, а не на згин. Тому більшість таких систем складається з трикутних комбінацій, які забезпечують: геометричну незмінність, рівномірний розподіл напружень, мінімізацію локальних деформацій, високий рівень конструктивної стійкості.

Згідно з дослідженнями з теорії стабільності сталевих конструкцій [3], такі конструкції демонструють значно кращу стійкість до втрати форми порівняно з плоскими системами.

### **2.1.4 Матеріали та сучасні підходи до формоутворення**

Структурні покриття можуть виконуватися зі сталі, алюмінію, залізобетону або композитних матеріалів. У сучасних проєктах активно застосовуються комбіновані системи — наприклад, сталеві стержневі мережі з мембранним заповненням або гібридні алюмінієво-сталеві модулі.

Сучасні цифрові методи проєктування, включаючи параметричне моделювання, методи оптимізації форми та числові алгоритми пошуку статичної рівноваги, дозволяють створювати складні архітектурні форми при забезпеченні необхідної несучої здатності. Дослідження з формоутворення та структурної морфології [4] підкреслюють, що оптимізовані геометрії часто дозволяють зменшити масу конструкції на 20–40 % за рахунок раціонального розподілу матеріалу.

## 2.1.5 Приклади застосування

**Olympic Stadium у Мюнхені.** Конструкції є класичним прикладом легких тентово-кабельних конструкцій, які забезпечують великий проліт, мінімальну вагу та візуальну прозорість. Навантаження передається через систему кабелів у натягу, що характерно для мембранних і тентових структур (рис.2.4).

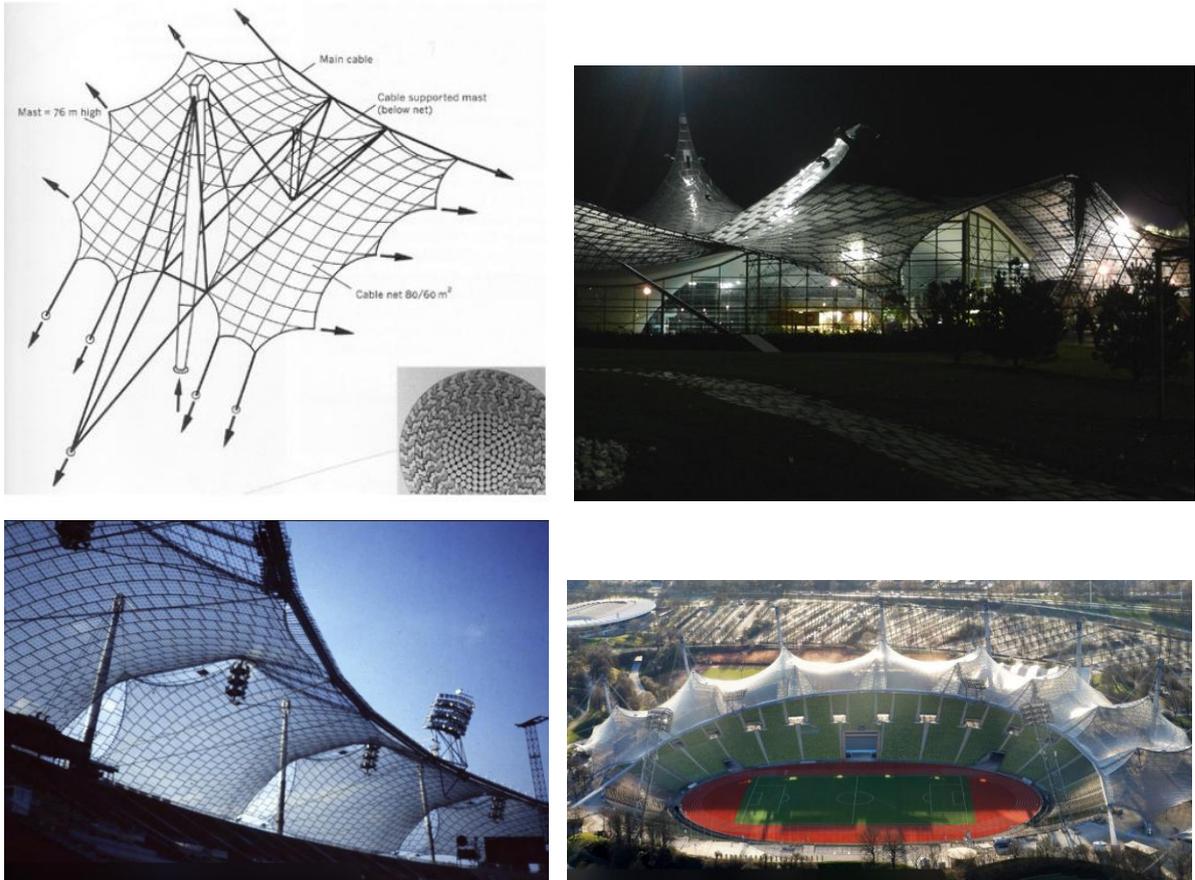


Рис.2.4 Олімпійський стадіон у Мюнхені (Німеччина)

**ЖК “Water Cube” у Пекіні.** Покриття виконано у вигляді просторової каркасної оболонки на основі стільникової структури. Покриття є прикладом просторової каркасної сталевий решітки у поєднанні з ETFE-мембраною. Структура базується на біоміметичній «бульбашковій» геометрії, що дозволяє створити легку, міцну та енергоефективну оболонку великого об’єму. (рис.2.5).



Рис.2.5 ЖК “Water Cube” (Пекін, Китай)

**Скелетні фермові куполи NASA.** Ці конструкції являють собою модульні сітчасті оболонки для великих ангарів. Такі конструкції позиціонуються як модульні просторові системи, у яких просторові рами або геодезичні решітки забезпечують високу несучу здатність при відносно невеликій масі. Сучасні дослідження як у запропонованому [11] підкреслюють переваги таких систем із точки зору модульності, оптимізації вузлів й ефективного розподілу зусиль (рис.2.6).

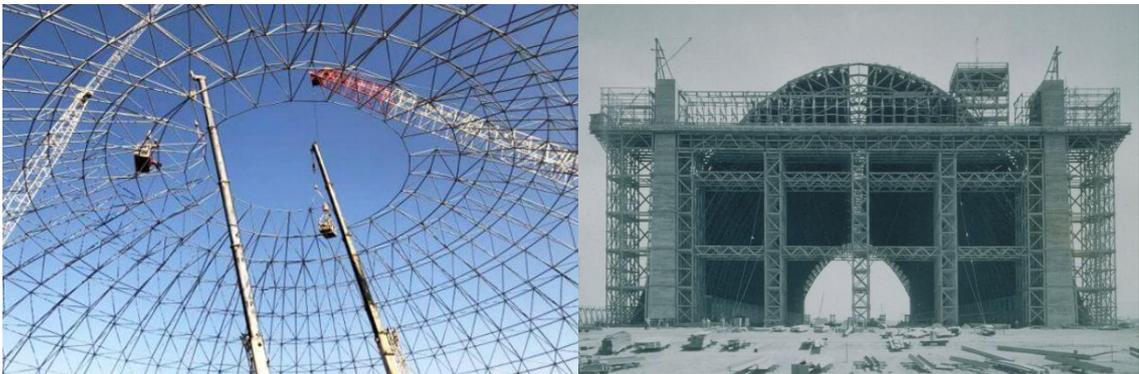


Рис.2.6 Скелетні фермові куполи NASA (Сполучені Штати Америки)

Ці приклади підтверджують універсальність структурних покриттів у сучасному будівництві.

### РОЗДІЛ 3

#### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення поставленої мети та реалізації визначених у роботі завдань у дослідженні застосовано комплекс взаємодоповнюючих теоретичних, числових, нормативних та аналітичних методів. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити роботу просторових стержньових структурних

плит, починаючи від формування розрахункових моделей і закінчуючи вибором найбільш раціонального конструктивного рішення.

Основним інструментом дослідження є **метод скінчених елементів** (МСЕ), який використано для побудови розрахункових моделей просторових стержневих плит та визначення їх напружено-деформованого стану. Реалізація цього методу здійснювалася у програмному комплексі ЛПРА-САПР 2024, що дозволило змодельовати реальну просторову роботу конструкцій із урахуванням геометричних параметрів, фізико-механічних характеристик матеріалів, граничних умов, а також характеру прикладених навантажень.

Для визначення внутрішніх зусиль, переміщень вузлів, деформацій та перевірки загальної просторової стійкості конструкцій застосовано **методи числового та лінійного статичного аналізу**. На основі отриманих результатів формувалися епюри внутрішніх зусиль, карти переміщень та деформацій, що дозволило провести якісну й кількісну оцінку роботи кожного конструктивного варіанта.

Оцінювання ефективності різних конструктивних схем виконувалося з використанням **методу порівняльного аналізу**. Порівняння проводилося між трьома моделями структурних плит, що мають однакові габаритні розміри, матеріали та умови навантаження, але відрізняються формою базового кристалічного елемента. Це дало змогу об'єктивно встановити вплив геометрії структурної сітки на напружено-деформований стан і матеріалоемність конструкцій.

Підбір та перевірка перерізів стержневих елементів здійснювалися за допомогою нормативного методу розрахунку, реалізованого у модулі «Метал» програмного комплексу ЛПРА-САПР 2024. Розрахунки виконувалися відповідно до вимог чинних нормативних документів із забезпеченням умов міцності, жорсткості та стійкості. На цій основі визначалася фактична ступінь використання перерізів елементів у кожній із розрахункових моделей.

Для зниження матеріальних витрат та підвищення ефективності конструктивних рішень застосовано методи оптимізаційного підбору

перерізів, які ґрунтуються на мінімізації маси конструкції за умови виконання всіх нормативних вимог. За результатами оптимізації проведено порівняльний аналіз ваги сталі для всіх варіантів і обґрунтовано вибір найбільш економічно доцільного рішення.

На етапі узагальнення результатів використано **аналітичний метод**, який дозволив систематизувати числові дані, виявити закономірності у роботі конструкцій та зробити обґрунтовані висновки щодо впливу форми базового елемента на ефективність структурних плит. Для наочного подання результатів застосовано **графічний метод**, що включає побудову розрахункових схем, епюр внутрішніх зусиль, полів переміщень і деформацій.

Загальна методологія дослідження базується на системно-структурному підході, який передбачає комплексну оцінку просторових конструктивних систем як єдиного взаємопов'язаного об'єкта. Це забезпечує об'єктивність отриманих результатів та підвищує наукову цінність виконаного дослідження.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЧИСЛОВІ МОДЕЛІ СТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ, ЩО Є ПРЕДМЕТОМ ДОСЛІДЖЕННЯ**

#### **4.1 Обґрунтування прийнятого об'ємно-планувального рішення конструкції структурної плити, що досліджується**

В якості конструкції, що досліджується, прийнято структурну стержньову плиту із прямокутним 12х6 м отвором посередині.

Просторові стержньові (кристалічні, сітчасті, ґратчасті) плити з центральними отворами мають не лише конструктивний сенс, а й потужний інструмент архітектурної виразності. У таких системах отвір стає композиційним ядром, а не «вирізом у плиті».

Отвори в просторових стержньових плитах виконують не лише конструктивну роль, а й мають значну архітектурну цінність, впливаючи на сприйняття простору, світло, форму та символіку будівлі. По-перше, вони формують композиційний центр простору, виступаючи візуальним ядром

будівлі. Навколо такого отвору організуються рух людей, вертикальні візуальні осі, а також просторові та функціональні ієрархії. Вони створюють природний «точковий центр» у плані та об'ємі будівлі, навколо якого «кристалізується» вся структура просторової плити, забезпечуючи цілісність і зрозумілість просторової композиції.

По-друге, отвори активно використовуються як джерело природного світла. Вони можуть виконувати роль зенітного ліхтаря, скляного купола або світлової шахти. Світло, проходячи через сітку стержнів, дробиться, утворюючи складну гру світлотіні та динамічну графіку, яка змінюється залежно від часу доби та розташування сонця. Таким чином, конструкція перетворюється на «архітектурний інструмент світла», де просторові елементи несуть не тільки механічне навантаження, а й формують унікальну атмосферу в приміщенні.

Крім того, отвір підсилює «кристалічну» естетику просторової плити. Базові кристалоподібні елементи системи підкреслюють фрактальність і повторюваність структури. Вирізаний фрагмент, що утворює отвір, створює враження «вичавленого» або «вирізаного кристалу», що асоціюється з мінеральними структурами, біонічними формами та принципами параметричної архітектури. Це дозволяє не тільки підкреслити геометричну чистоту конструкції, а й внести додаткову естетичну глибину та складність у сприйняття простору.

Візуально отвори роблять масивні покриття «легшими». Без них плити часто виглядають громіздкими та створюють ефект «важкого неба». Отвір «розряджає» обсяг, надає конструкції відчуття паріння та просторової прозорості, створюючи глибину і перспективу, яка підсилює відчуття масштабності та легкості будівлі.

Символічно отвір у покритті може інтерпретуватися як «вікно в небо», «око будівлі», «енергетичний центр простору» або «просторова домінанта». Це особливо ефективно для музеїв, павільйонів, вокзалів, меморіалів та культових

споруд, де отвір стає центральним образним елементом, який задає емоційний тон усьому простору.

Додатково, отвори можуть виконувати функцію природної вентиляції та мікрокліматичного регулювання простору, забезпечуючи пасивне освітлення та циркуляцію повітря. В поєднанні з інженерними рішеннями, такими як конструктивні ферми або інтегровані світлопрозорі елементи, вони дозволяють поєднати естетику, функціональність і енергоефективність у єдиній конструктивній системі.

Таким чином, отвори в стержньових просторових плитах поєднують конструктивну функцію з архітектурною виразністю, світлотворчістю, естетикою та символічним навантаженням, формуючи багат шаровий просторовий образ будівлі, який одночасно є функціональним, емоційним і візуально привабливим. Вони стають ключовими елементами дизайну, що визначають характер простору та його сприйняття користувачами.

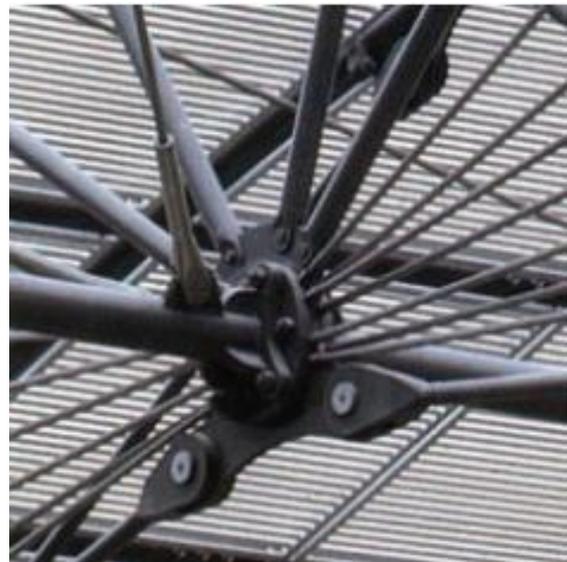


Рис. 4.1 Покриття скульптурних площ музеєм у Луврі



Рис. 4.2 Внутрішній атриум Британського музею, що являє собою просторову

а)

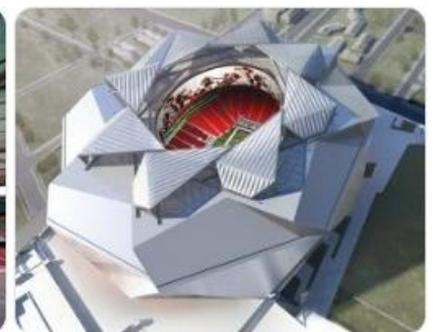
конструкція зі скла

б)



Рис. 4.3 Стержньова одношарова просторова оболонка – а; оболонка просторова каркасна структура-б

У цьому прикладі (рис.4.2) отвір виступає архітектурним акцентом, формує простір атриуму та водночас виконує практичні функції: забезпечує димовидалення, природне освітлення та вентиляцію.



#### Рис.4.4 Приклади стадіонів та павільйонів зі «світловим кільцем»

У подібних спорудах отвір допомагає зняти відчуття візуальної масивності, утворює масштабний просторовий портал і водночас підсилює сприйняття величини споруди.

У параметричній та «кристалічній» архітектурі отвір є невід'ємним елементом формоутворення: він не сприймається як довільно вирізаний фрагмент, а органічно впливає з самої логіки геометрії та морфології структури. Такий отвір стає багатофункціональним елементом – одночасно працює як канал для природного світла, вузол вентиляції й композиційний розрив, що збагачує просторову організацію та підкреслює алгоритмічну природу форми.

Структурна плита розмірами 36×36 м у плані виконує роль перфорованого світлового атріуму, в центрі якого передбачено відкритий отвір. Природне світло проникає всередину, каскадно проходячи крізь просторову гратчасту структуру (рис. 4.5).

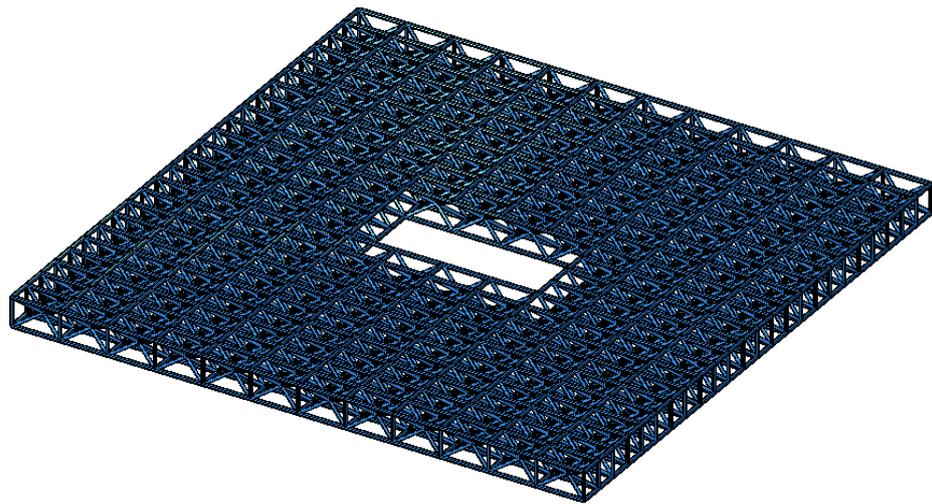


Рис. 4.5 Просторова модель структурної плити 36х36 м, що виконує роль перфорованого світлового атріуму, в центрі якого передбачено відкритий отвір

Отже, у просторових стержньових плитах із «кристалічною» геометрією центральний отвір сприймається не як конструктивний недолік, а як ключова архітектурна домінанта. Він формує композиційний центр, створює виразну

світлову драматургію, візуально полегшує масу покриття та підсилює логіку кристалічної структури. Завдяки цьому конструкція переходить у площину архітектурного образу, поєднуючи інженерну раціональність і художню виразність.

#### 4.2 Форма базового структуроутворюючого елементу

Отже, моделі, що будуть досліджуватися числовим методом, формуються методом мультиплікації по двом осям X та Y горизонтальної площини XOY тривимірної системи координат (рис.4.6).

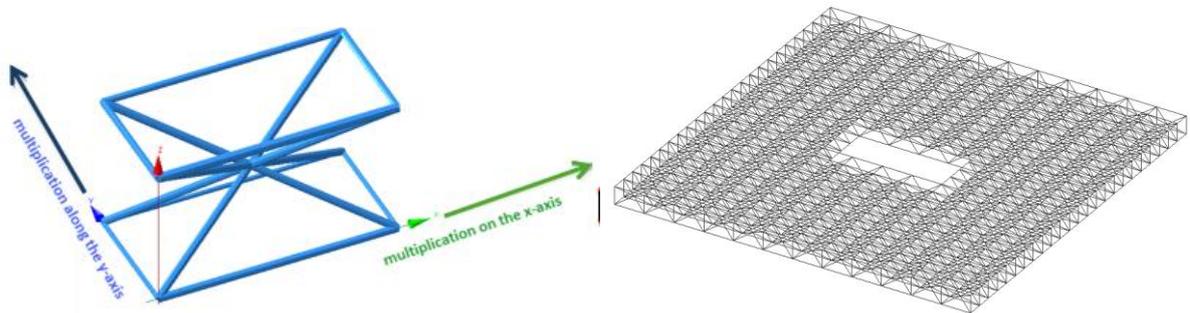


Рис. 4.6 Базовий кристал (формуєтворюючий елемент) для схеми №1 -а; структура просторової сітки, утворена множенням базового елемента вздовж осей X і Y -б для схеми №1

Форма базового формуєтворюючого елемента стрижневої просторової плити є визначальним чинником для її напружено-деформованого стану, оскільки саме геометрична схема задає траєкторії силових потоків, формує системи розтягнутих і стислих стрижнів, визначає жорсткісні характеристики та стійкість конструкції. Три показані на рис. 4.7 варіанти мають суттєві відмінності у просторовій роботі та механічній ефективності.

Для подальшого моделювання структурних плит приймемо базові формуєтворюючі елементи трьох типів, що наведено на рис.4.7.

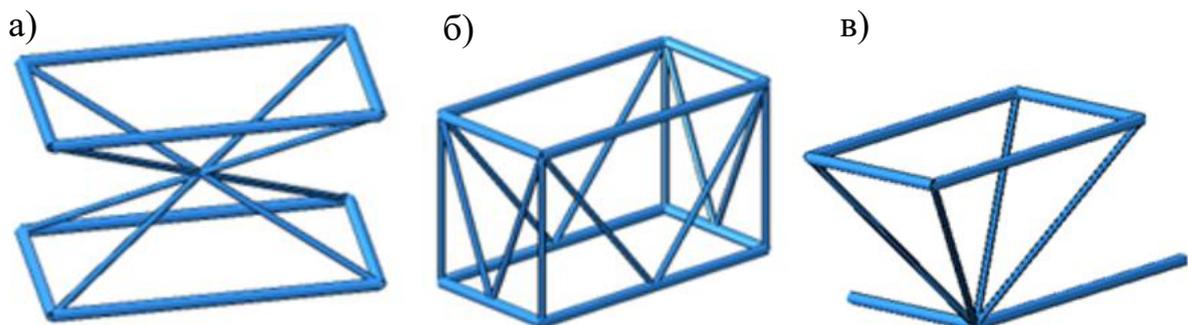


Рис. 4.7 Форми базових елементів, що утворюють кристалічне тіло стержньової просторової плити покриття: X-подібний елемент-а; об'ємно-просторова схема з багатоспрямованими діагоналями -б;  
конусоподібний елемент-в

### *1. X-подібний (симетричний) елемент*

У цьому варіанті домінує чітка сітка діагональних зв'язків, що дозволяє формувати ефективну схему передачі зусиль між верхнім і нижнім поясами (рис. 4.7,а).

Стрижні працюють переважно на розтяг і стиск, формуючи з мінімальним згином виражену ферменну роботу. Симетрія забезпечує рівномірний розподіл деформацій та зменшує ризик локальної нестійкості. Такий елемент добре чинить опір як вертикальним навантаженням, так і просторовим впливам, забезпечуючи достатню бокову жорсткість.

### *2. Об'ємно-просторова схема з багатоспрямованими діагоналями*

Другий елемент являє собою фактично модуль тривимірної ферми з діагоналями, розташованими у всіх площинах (рис. 4.7,б).

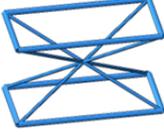
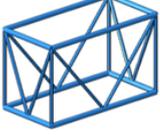
Така структура значно підвищує просторову жорсткість, формуючи комбінацію трикутних контурів, які ефективно працюють на різні типи навантаження: вертикальні, горизонтальні, крутильні. Завдяки об'ємній формі елемент здатний рівномірно розсіювати зусилля у трьох напрямках, що мінімізує деформації та зменшує концентрації напружень. Це найбільш універсальний та конструктивно стабільний варіант.

### *3. Конусоподібний (розкритий) елемент*

Третя схема має акцентовану вертикальну спрямованість стрижнів, що зводяться у нижній вузол. Більша частина навантаження передається через цей вузол, що призводить до концентрації напружень і підвищених вимог до його жорсткості та надійності. При вертикальних навантаженнях елемент працює ефективно, однак його просторові жорсткісні характеристики менш рівномірні, що може призвести до чутливості до горизонтальних та крутильних впливів. Така схема потребує додаткових засобів стабілізації.

В таблиці 4.1 наведено ступінь впливу форми базового елемента на різні характеристики напружено-деформованого стану структурної плити.

Таблиця 4.1 Вплив форми елемента на напружено-деформований стан

Характеристика	X-подібний елемент 	Об'ємно-просторовий модуль 	Конусоподібний елемент 
Просторова жорсткість	Висока	Дуже висока	Середня
Рівномірність розподілу напружень	Добра	Відмінна	Нерівномірна
Стійкість до крутіння	Достатня	Висока	Низька–середня
Сприйняття вертикальних навантажень	Високе	Високе	Дуже високе (уздовж осі)
Сприйняття горизонтальних навантажень	Добре	Відмінно	Посередньо
Чутливість до локальних деформацій	Помірна	Низька	Підвищена
Вимоги до вузлів	Стандартні	Помірно підвищені	Високі (особливо до основного вузла)
Загальна конструктивна ефективність	Висока	Найвища	Середня

Отже, геометрія базового формоутворюючого елемента є критично важливою для напружено-деформованого стану стрижневої просторової плити. Найбільш ефективним з погляду просторової роботи та рівномірності напружень є об'ємно-просторовий модуль, який забезпечує максимальну жорсткість та універсальність. X-подібний елемент також демонструє високу несучу здатність, особливо в умовах ферменної роботи. Конусоподібний елемент, хоча й здатний добре сприймати вертикальні навантаження,

характеризується нерівномірним розподілом жорсткості та підвищеною концентрацією напружень, що обмежує його застосування без додаткової стабілізації.

### **4.3 Скінченоелементні моделі просторової плити, що досліджується**

Габарити, схема дії навантажень і тип кристала залишаються однаковими для всіх моделей. Розрахунок ведуть із урахуванням міцності розтягнутих і стійкості стиснутих стрижнів, а також вимог до їхньої гнучкості та прогину. Конструкції прийнято зі шарнірними вузлами й стрижнями з прямошовних електрозварних труб [15].

Квадратна в плані решітчаста плита працює в обох напрямках і належить до найефективніших просторових систем; ліхтарі, перепади висот і звичний двосторонній ухил для водовідведення не враховуються.

За [8], коли співвідношення сторін дорівнює 1:1, плита працює за двома напрямками (вздовж осі X та вздовж осі Y) [7].

Стержньова структурна просторова плита має квадратну в плані форму з розмірами сторін 36x36 м. Така конструкція здатна перекрити значний проліт без улаштування додаткових опор.

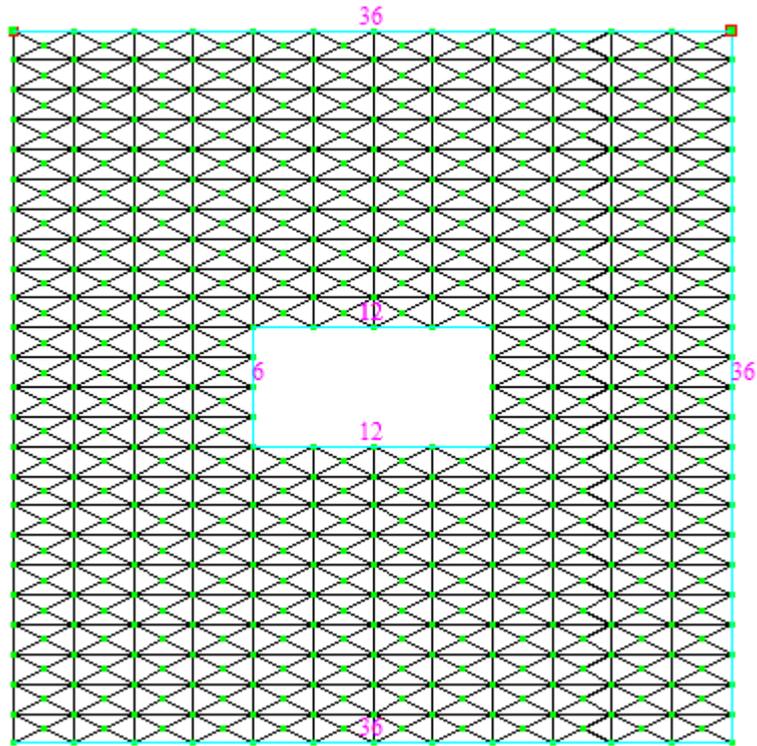


Рис.4.8 Вид плити 36х36 м зверху (на прикладі схеми №1)  
в площині ХОУ

Але отвір в центрі конструкціях розміром 6,0х12,0 м забезпечує верхнє освітлення внутрішнього простору та архітектурну виразність.

На рис.4.9 наведено вигляди конструкції в площинах ХОZ та YOZ тривимірної системи координат.

Висота (товщина) плити становить 1,8 м. Висота колон складає 7,8 м.

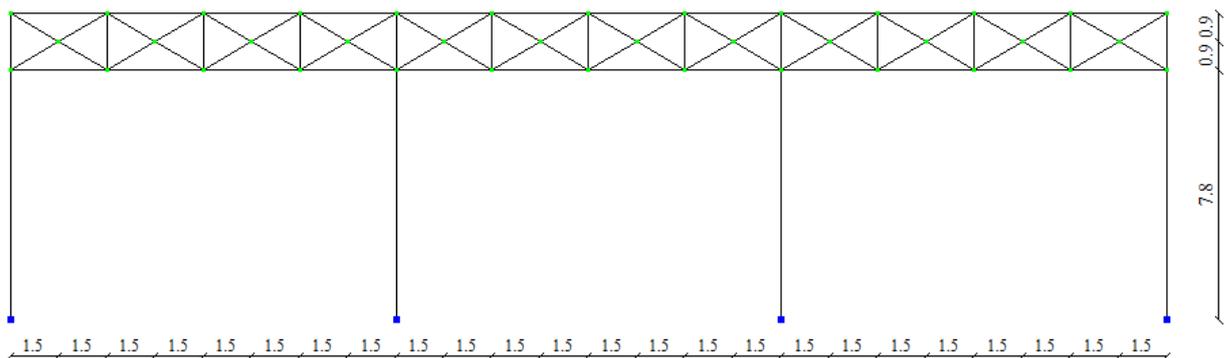


Рис.4.9 Вид плити (на прикладі схеми №1) в площині ХОZ

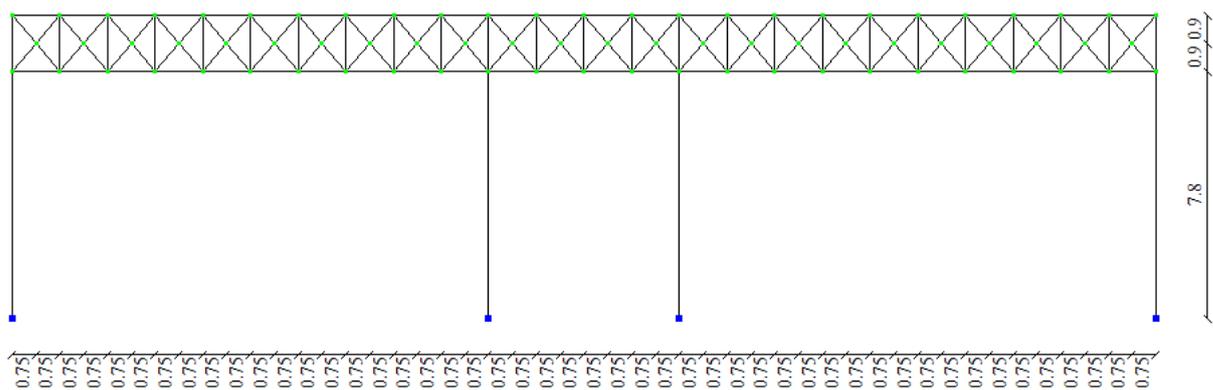


Рис.4.10 Вид плити (на прикладі схеми №1) в площині YOZ

На рис.4.11 наведено скінченоелементні моделі плит, що досліджуються та їх просторовий виклад в площині XOZ.

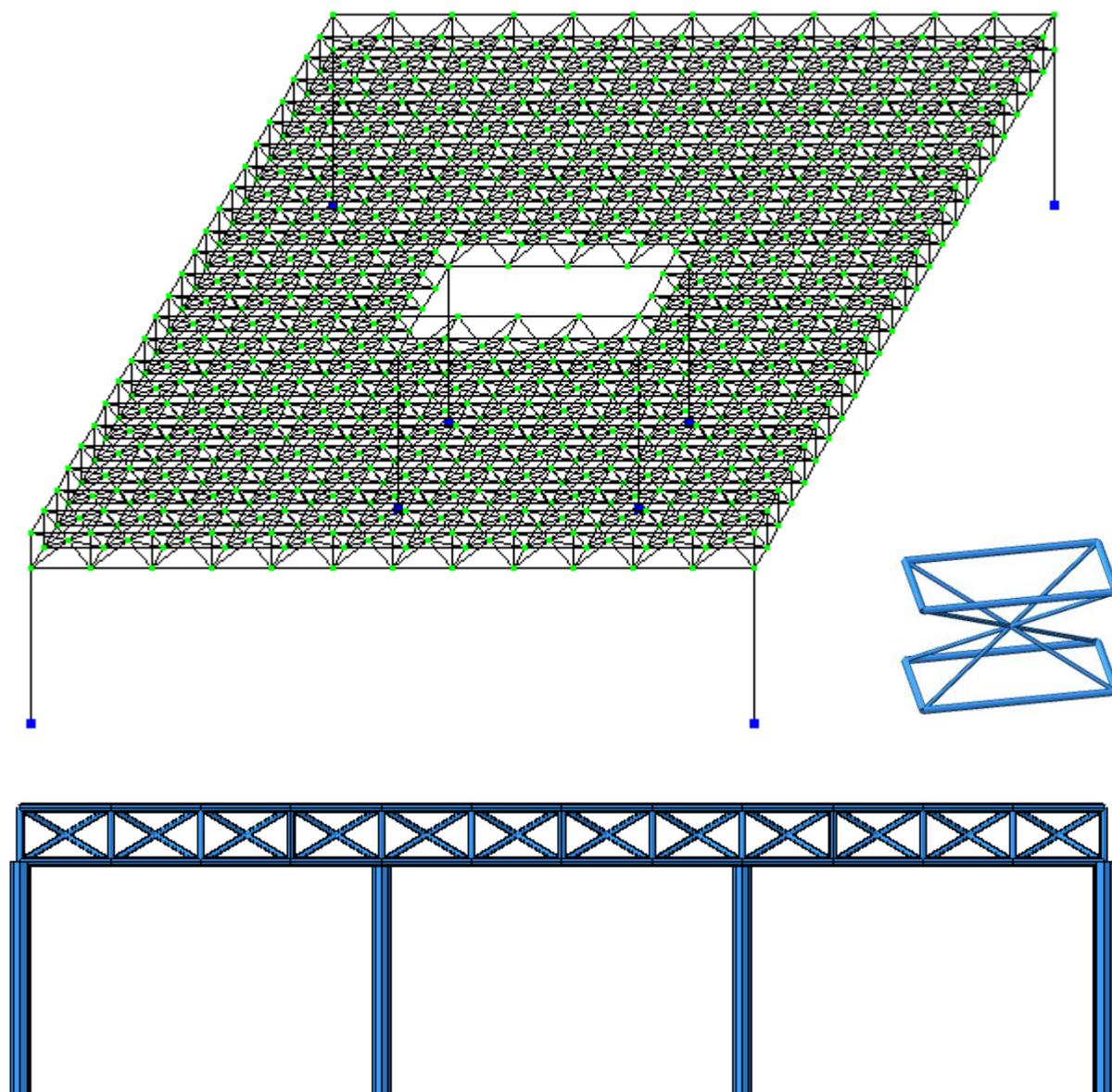


Рис.4.11 Скінченоелементна модель -а; просторова модель в площині XOZ -б, в для Схеми №1

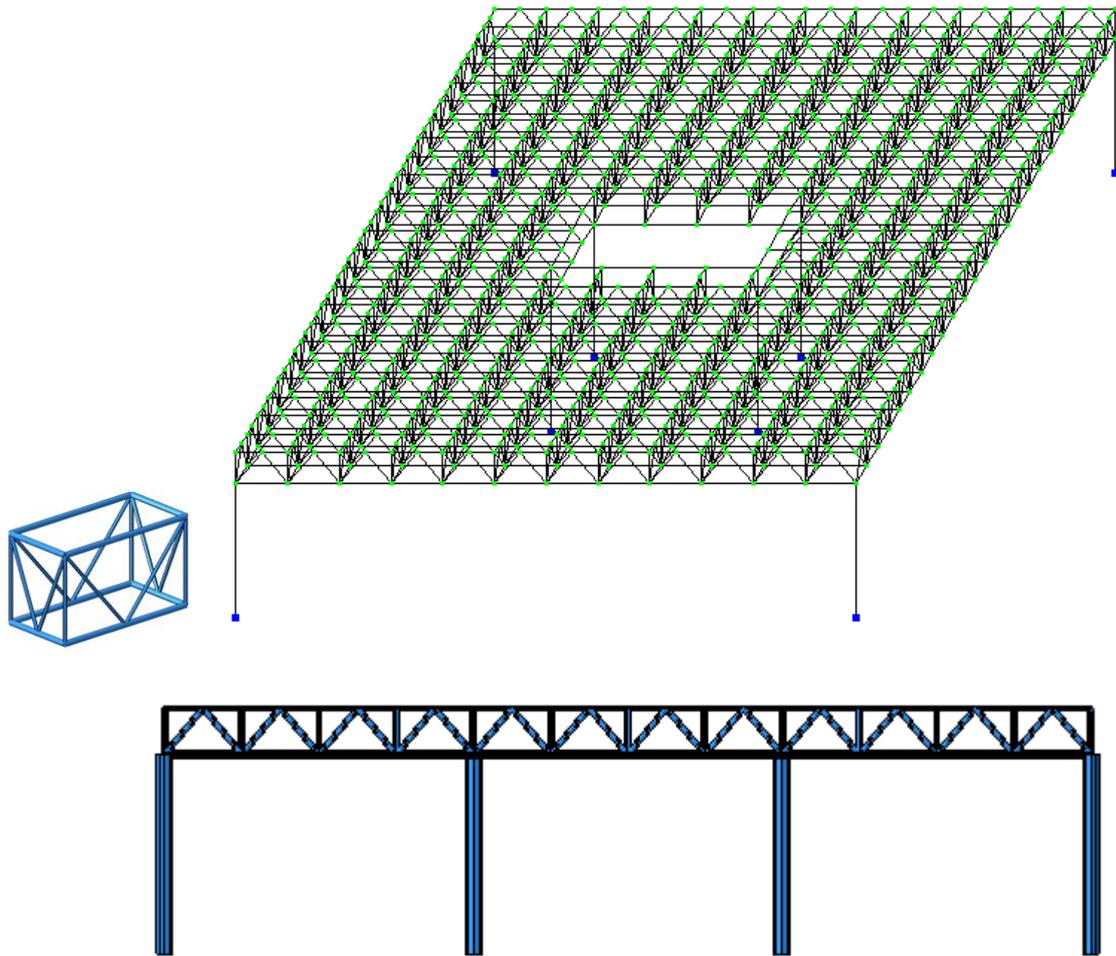
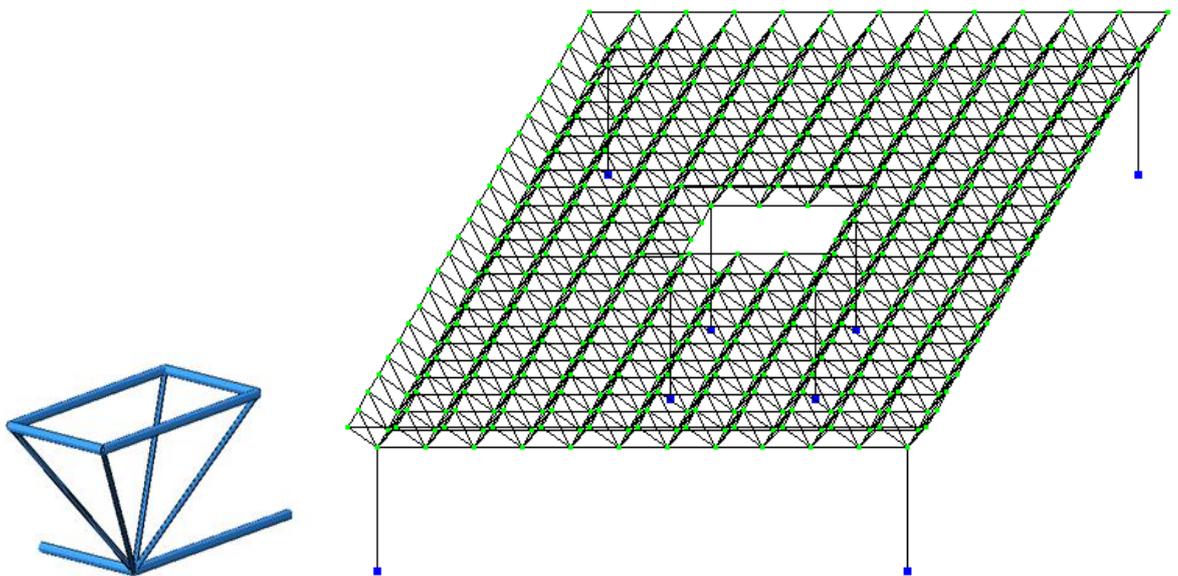


Рис. 4.12 Скінченоелементна модель -а; просторова модель в площині XOZ -б, в для Схеми №2



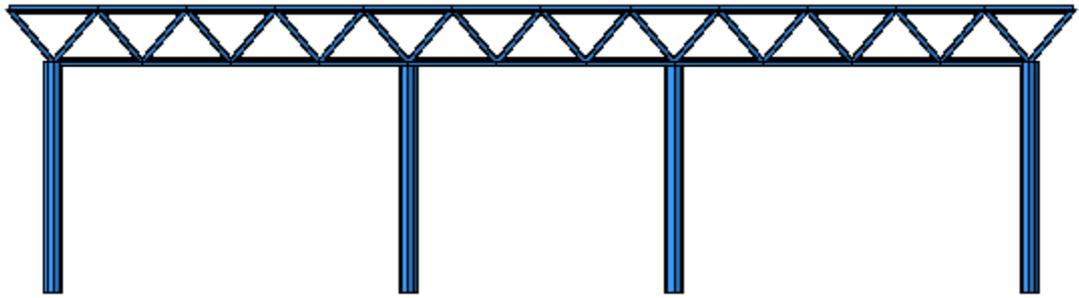


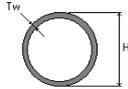
Рис. 4.13 Скінченоелементна модель -а; просторова модель в площині ХОZ -б, в для Схеми №3

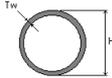
#### 4.4 Параметри жорсткості перерізів та характеристик матеріалів, що прийнято. Граничні умови

Всі елементи просторової плити прийняті із сталі конструкційної, вуглецевої для будівельних конструкцій. Як матеріали для конструювання прийнято профілі трубчатого перерізу із сталі класу С235 за [9] з характеристиками міцності:  $R_y = 230 \text{ Па} = 24,0 \text{ кН/см}^2$ ,  $R_{yn} = 235 \text{ Па} = 23,5 \text{ кН/см}^2$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^8 \text{ кН/см}^2$ ,  $\gamma = 77,0085 \text{ кН/м}^3$ ,  $\mu = 0,3$

Для числового аналізу змодельовано просторову розрахункову схему: просторову стрижневу плиту та систему колон, що її підтримують. Елементи плити моделювалися як стрижні загального вигляду з шістьма ступенями свободи. Колони змодельовано теж скінченим елементом №10, що має шість ступенів свободи у кожному вузлі. Усі вузли конструкції прийнято шарнірними (рис. 4.4). Параметри жорсткості стрижнів зведено в таблицю 4.2

Таблиця 4.2 Жорсткісні параметри компонентів структурної плити

Назва елемента	Поперечний переріз, см	$E, \text{т/м}^2$	$R, \text{т/м}^3$	$\mu$	$A, \text{см}^2$	$q, \text{т/м}$
1.Стержні верхнього поясу	Труба 273x15 	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	121,58	0.095

2.Стержні нижнього поясу	Труба 273x15 	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	121,58	0.095
3.Розкоси структурної плити	Труба 219x30 	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	178,128	0,140
4. Колони	Труба 630x9 	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	175,58	0,138

Прийняте рухоме, тобто шарнірне спирання просторової плити на колони. З'єднання сталеві колони з фундаментом прийнято як вузол, де заборонені всі три лінійні переміщення за трьома осями координат.

#### 4.5 Навантаження на скінченоелементні моделі

Вітровий тиск не враховується, оскільки він становить близько одного відсотка та практично не впливає на роботу конструкції. Для міста Суми прийняте снігове навантаження  $1,67 \text{ кН/м}^2$ , рівномірно розподілене по горизонтальній поверхні плити.

Прийнято три розрахункових завантаження (вітрове не враховуємо):

- 1) Власна вага всіх елементів (визначається в програмі автоматично згідно первісно прийнятих параметрів жорсткості - див. табл. 4.3). Це постійне навантаження за [16].
- 2) Навантаження від конструкції покрівлі (див. табл.4.3) є постійним навантаженням згідно [16].
- 3) Навантаження від снігу для міста Суми є тимчасовим короткочасним типом навантаження за [16] та його характеристичне значення для міста Суми становить  $167 \text{ кг/м}^2$ .

Завантаження №№2 та 3 було спочатку обраховано на 1 м<sup>2</sup> верхнього поясу плити покриття, а потім, згідно величини вантажної площі для кожного вузла переведено у точкове (зосереджене у вузлі верхнього поясу) навантаження.

Таблиця 4.3 Збір навантаження на 1 м<sup>2</sup> просторової плити

№ з/п	Назва конструктиву	Нормативне значення, кг/м <sup>2</sup>	Коефіцієнт надійності $\gamma_f$	Розрахункове значення, кг/м <sup>2</sup>
<b>1. Постійні навантаження</b>				
1	Наплавлюваний єврорубероїд «Акваізол»	10	1,2	12
2	Утеплювач – мінераловатні плити підвищеної жорсткості на синтетичному в'язучому	10	1,3	13
3	Пароізоляція – 1 шар руберойду	5	1,2	6
4	Профнастил	15	1,1	16,5
5	Прогони покриття із гнучого профілю [18 (14,96 кгс/м.п)]	1,29	1,1	1,42
6	Власна вага структури	Задається автоматично в ПК ЛІРА-САПР		
<b>ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ</b>		<b>116,1</b>		<b>133,42</b>
<b>2. Тимчасові навантаження</b>				
7.	Снігове (за [16])	167	1,14	190,38
<b>Всього тимчасове:</b>		167		190,38
<b>РАЗОМ (постійне та тимчасове)</b>		<b>244,18</b>		<b>328,8</b>

На рис.4.14 наведено скінченоелементні моделі, до яких прикладено розрахункові завантаження.

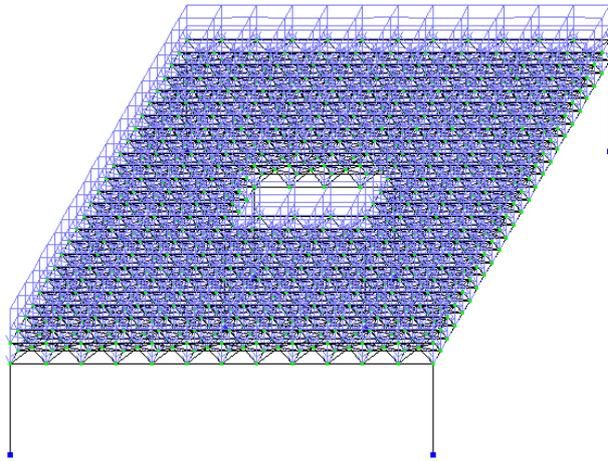


Рис.4.14 Завантаження №1: власна вага конструкції (на прикладі схеми №1)

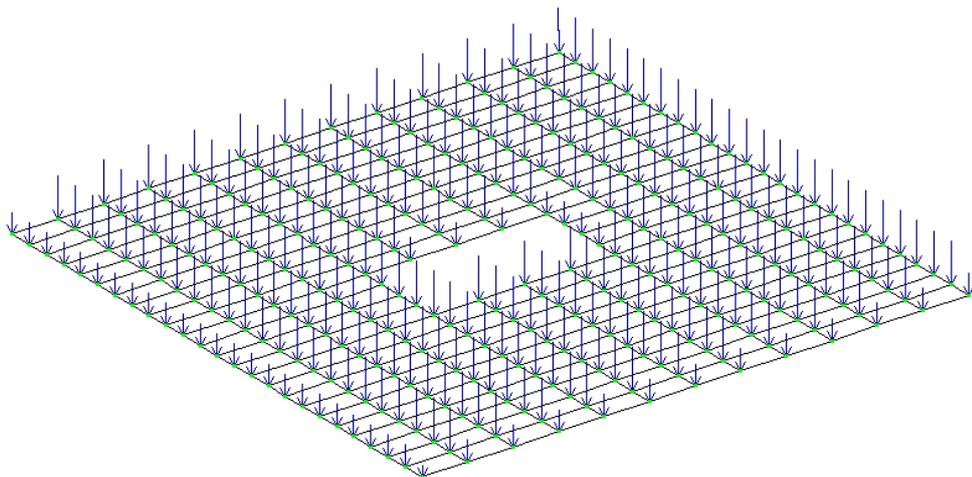


Рис.4.15 Завантаження №2: власна вага конструкції покрівлі (на прикладі схеми №1)

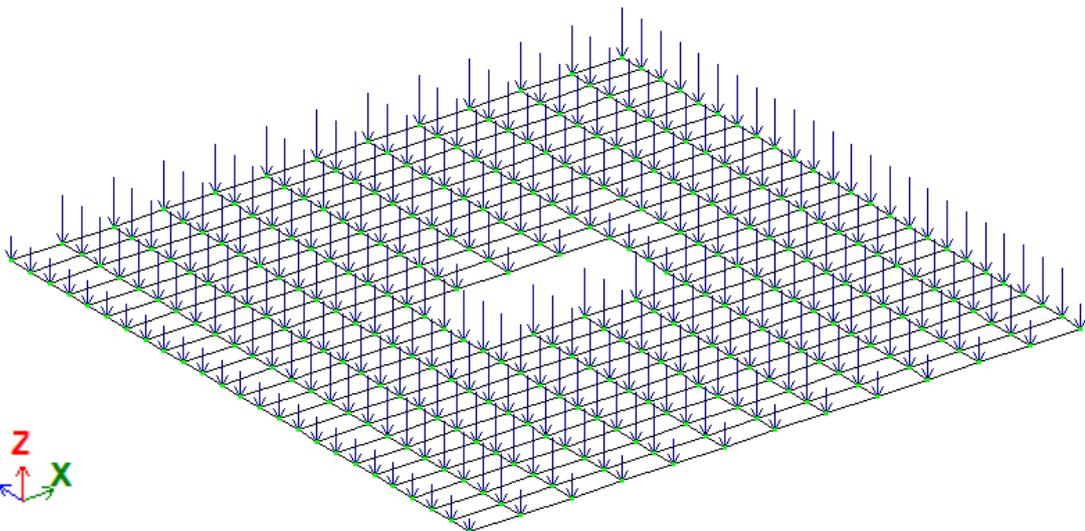


Рис.4.16 Завантаження №3: власна вага конструкції покрівлі (на прикладі схеми №1)

На рис.4.17 наведено діалогове вікно в ПК Ліра-САПР, де наведені типи завантажень, що прийняті.

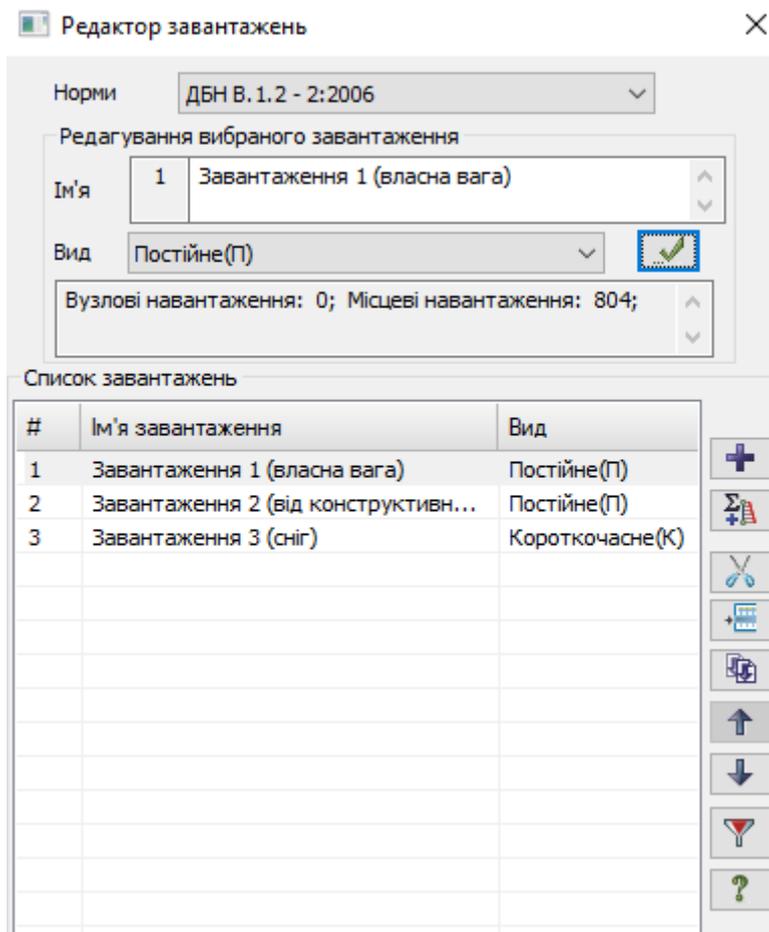


Рис.4.17 Вікно завантажень в ПК Ліра-САПР

## РОЗДІЛ 5

### РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНОГО ПОКРИТТЯ

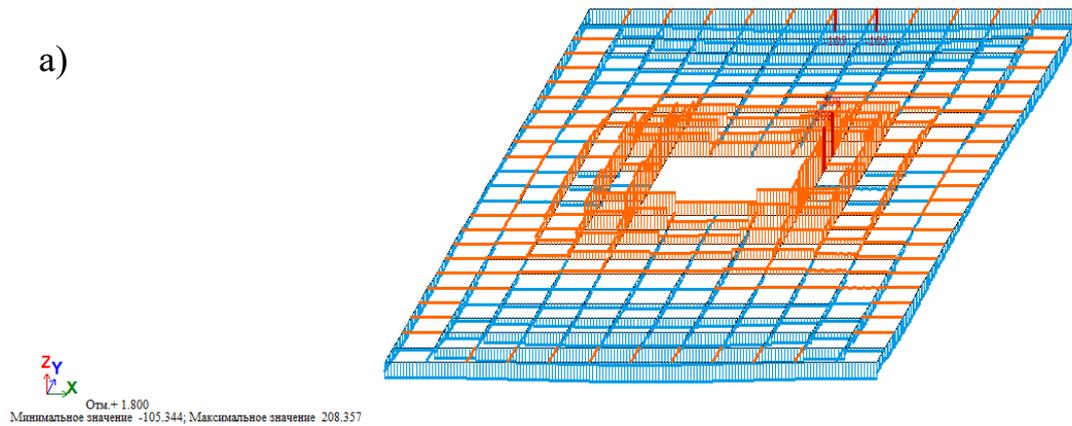
Статичний розрахунок виконували для оцінки напружень і деформацій конструкції. Перерізи розтягнутих елементів добирали за міцністю, стиснутих – за стійкістю, враховуючи граничну гнучкість і вертикальні переміщення. Для перевірки несучої здатності сформовано чотири групи елементів: верхній та нижній пояси, розкоси та колони. Пояси розглядали як елементи ферми, розкоси – як решітку, колони – як стійки;  $\gamma_n = 1,0$ . Для колон прийнято коефіцієнти розрахункової довжини 0,6 у двох площинах та граничні гнучкості  $180-60\alpha$  [9]. Розрахунок сталевих елементів виконували в пружній стадії.

## 5.1 Зусилля в стержнях структури

Елементи верхнього поясу працюють переважно в умовах стиску, тоді як нижній пояс сприймає розтяг. Відповідні епюри подано на рис. 5.1–5.2. Розкоси мають змінний характер осьових зусиль  $N$ , тобто можуть переходити від роботи на розтяг до роботи на стиск і навпаки (рис.5.3).

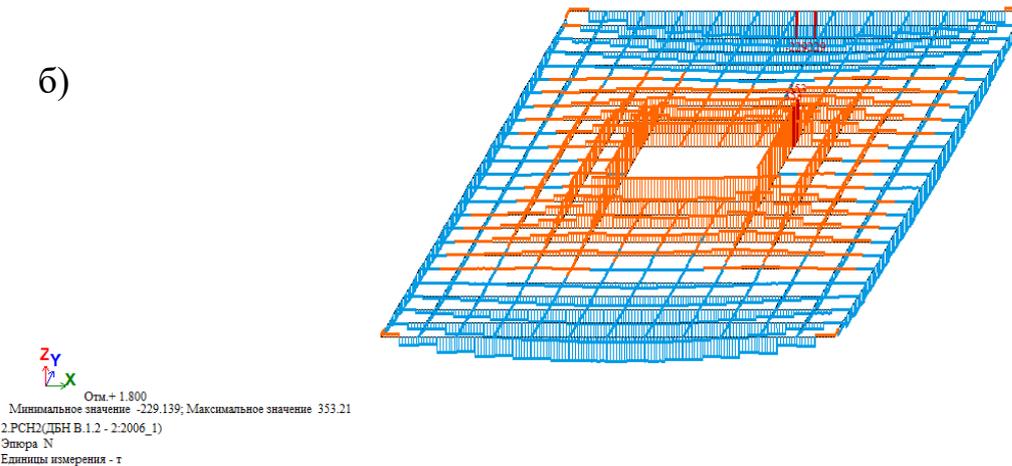
2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епора N  
Единиці вимірювання - т

а)



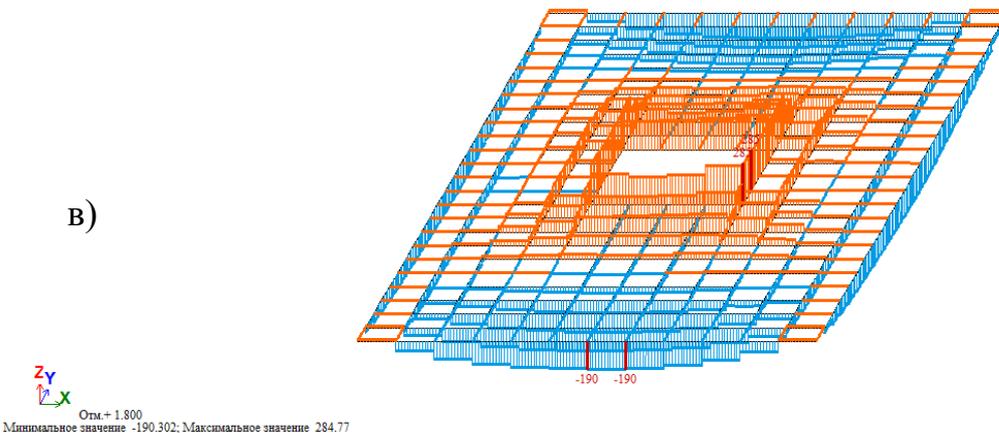
2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епора N  
Единиці вимірювання - т

б)



2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епора N  
Единиці вимірювання - т

в)

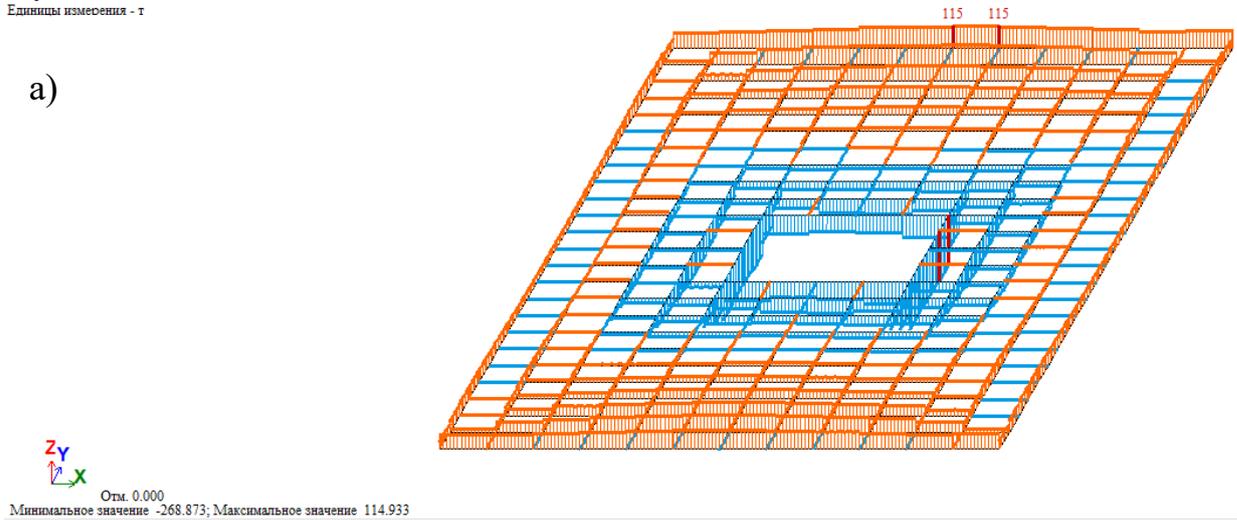


2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епора N  
Единиці вимірювання - т

Рис.5.1 Епюри осьових зусиль N від РСН2 для верхнього поясу структури:  
 схема №1 ( $N_{\max} = -105,34$  т;  $N_{\max} = +208,36$  т) -а; схема №2 ( $N_{\max} = -229,14$   
 т;  $N_{\max} = +353,21$  т) -б; схема №3 ( $N_{\max} = -190,3$  т;  $N_{\max} = +284,8$  т)-в

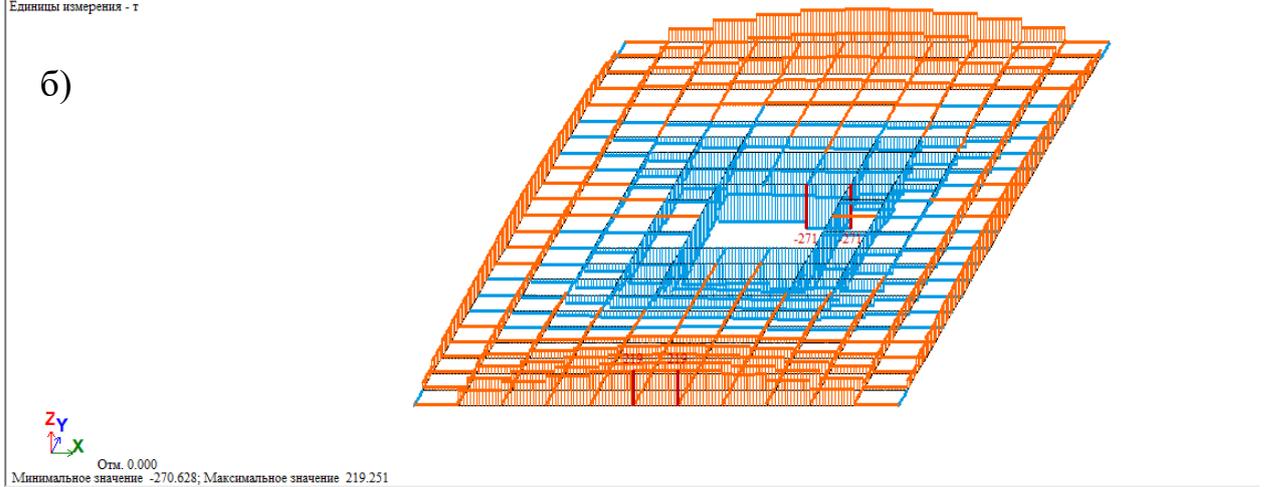
2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
 Эпюра N  
 Единицы измерения - т

а)

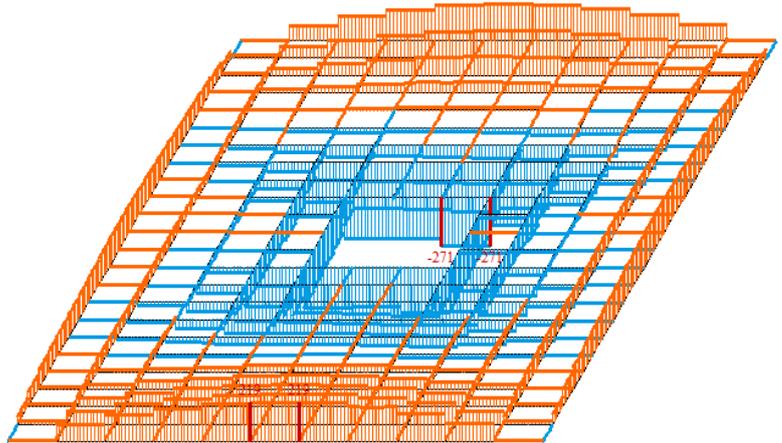


2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
 Эпюра N  
 Единицы измерения - т

б)

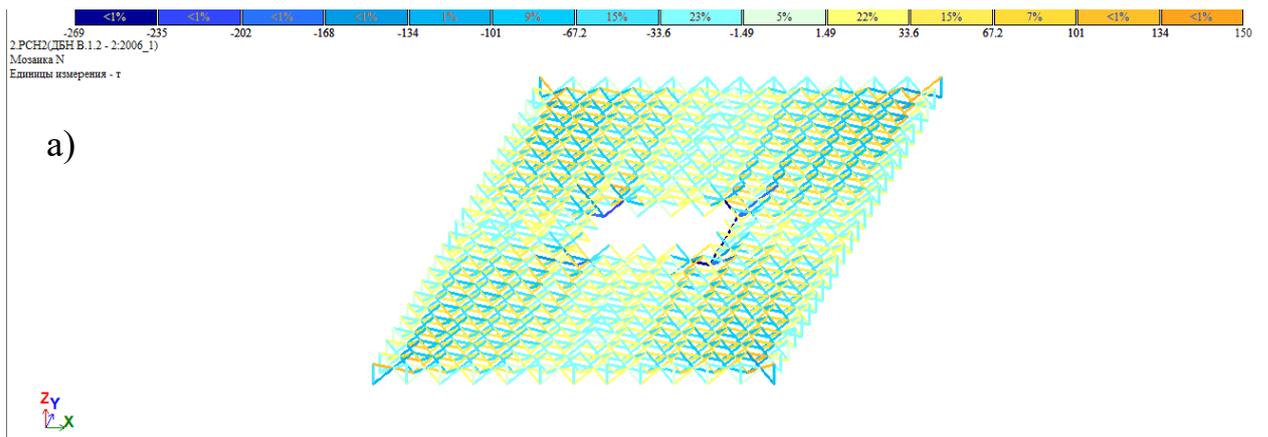


В)

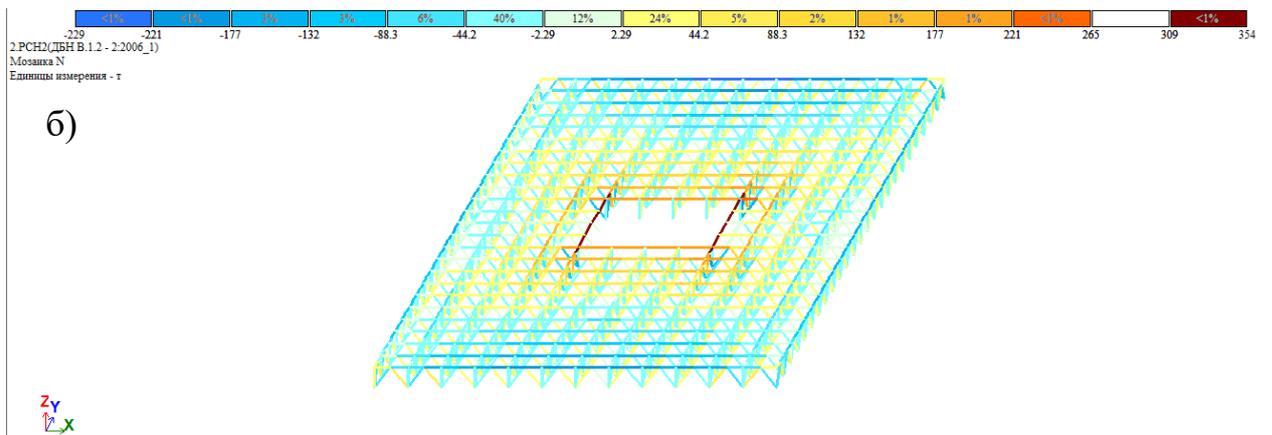


Отм. 0.000  
 Минимальное значение -270.628; Максимальное значение 219.251

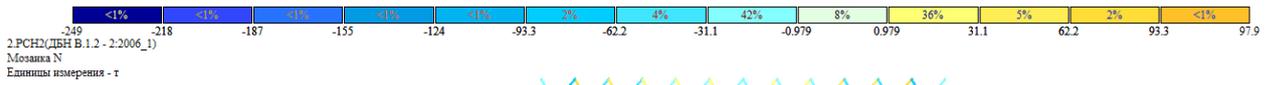
Рис.5.2 Епюри осевых зусиль N від РСН2 для нижнього поясу структури:  
 схема №1 ( $N_{max}=-268,9$  т;  $N_{max}=+114,9$  т) -а; схема №2 ( $N_{max}=-338,2$  т;  
 $N_{max}=+211,8$  т) -б; схема №3 ( $N_{max}=-270,6$  т;  $N_{max}=+219,3$  т)-в



а)



б)



В)

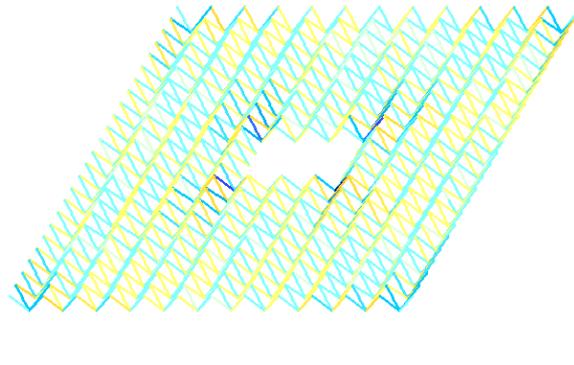
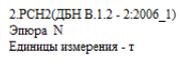
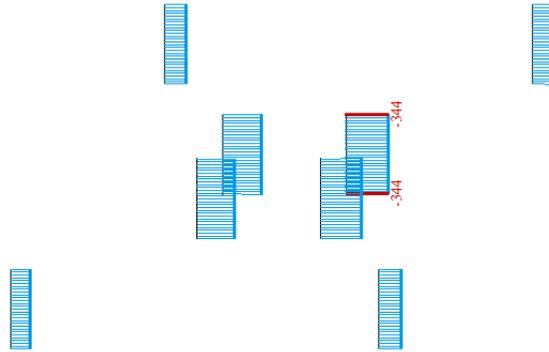


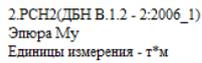
Рис.5.3 Мозаїка осьових зусиль N від РСН2 для решітки структури: схема №1 (N max=-268,9 т; N max= +149,5 т) -а; схема №2 (N max=-229,14 т; N max= +353,21 т) -б; схема №3 (N max=-278,45 т; N max= +97,85 т)-в



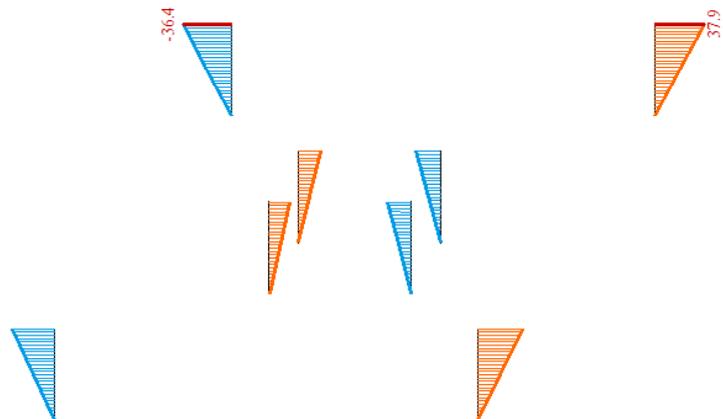
а)



Минимальное значение -343.639;



б)



Минимальное значение -36.3557; Максимальное значение 37.8535



Рис.5.4 Епюри зусиль в колонах системи на прикладі Схеми №1 від РСН2: осьові сили N ( $N_{\max}=-343,6$  т); моменти згину  $M_y$  ( $M_{y, \min}=-36,4$  тм;  $M_{y, \max}=37,85$  тм)-б; моменти згину  $M_z$  ( $M_{z, \min}=-29,3$  тм;  $M_{z, \max}=28,06$  тм)-в

У таблиці 5.1 подано граничні значення стискуючих і розтягувальних зусиль, які формуються у верхньому та нижньому поясах, а також у розкосах досліджуваних конструкцій.

Таблиця 5.1 Максимальні зусилля N в конструктивних групах стержнів просторової плити

№ схеми	Верхній пояс		Нижній пояс		Решітка	
	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг
1	-105,3	208,36	-268,9	114,9	-268,9	149,5
2	-229,1	353,21	-338,2	211,8	-229,1	353,2
3	-190,3	284,8	-270,6	219,3	-278,5	97,85

На рисунку 5.5 подано візуалізовані дані, що відповідають таблиці 5.1.

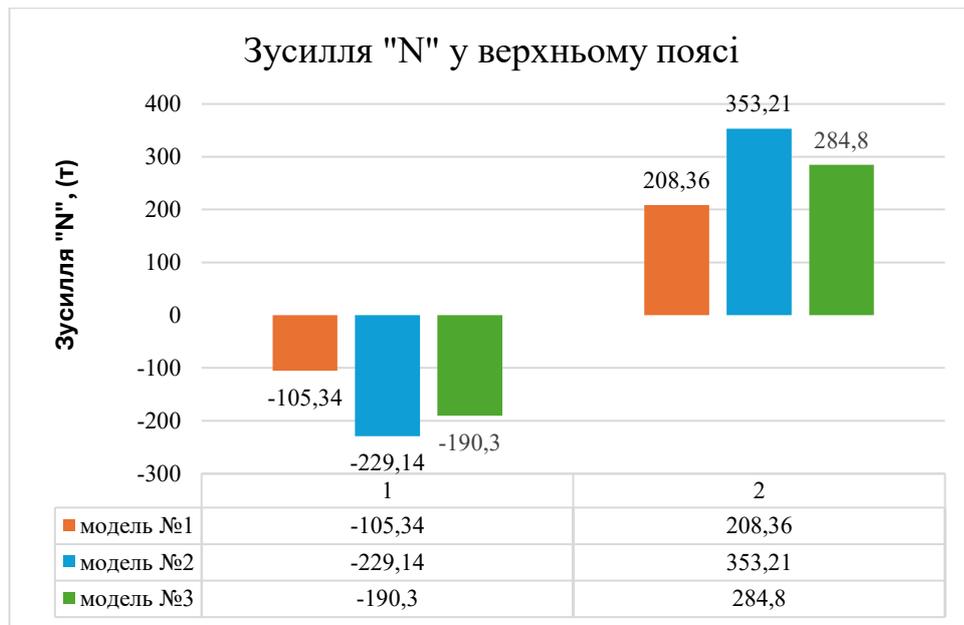


Рис. 5.5 Максимальні зусилля "N" у верхньому поясі моделей плит від РСН 2

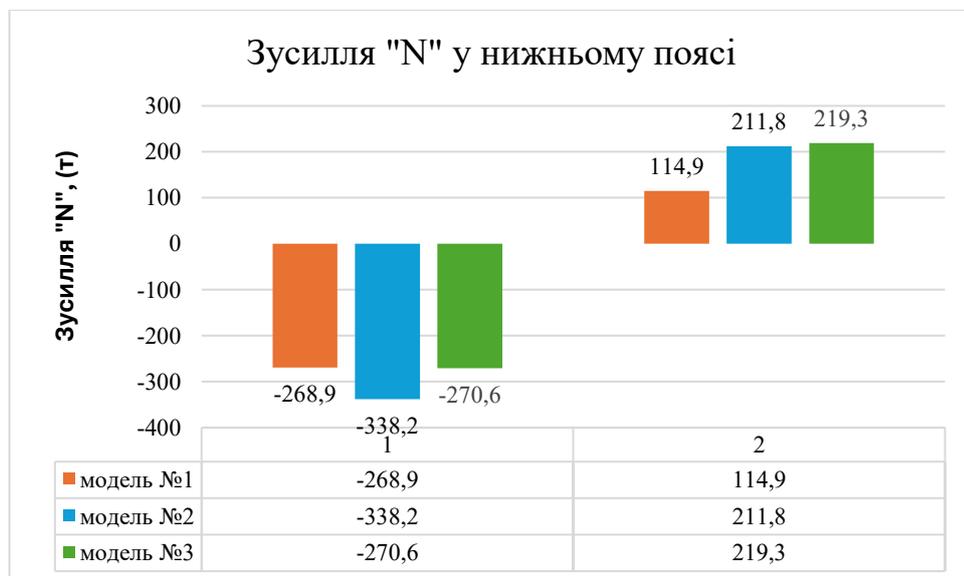


Рис.5.6 Максимальні зусилля "N" у нижньому поясі моделей плит від РСН 2

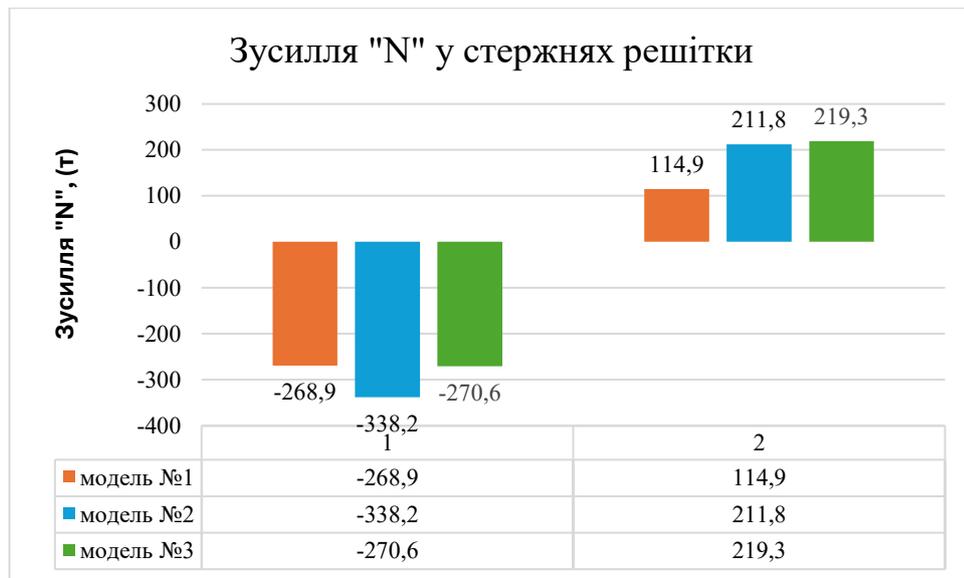


Рис.5.7 Максимальні зусилля "N" в стержнях решітки від РСН 2

На основі отриманих даних можна зробити узагальнені висновки щодо характеру зусиль, які виникають у стержнях структурної плити. У верхньому поясі для всіх трьох схем спостерігаються як стискуючі, так і розтягувальні зусилля, причому розтяг суттєво переважає за абсолютним значенням. Найвищі значення як стиску, так і розтягу фіксуються у схемі №2, що свідчить про найбільш інтенсивну роботу верхнього поясу саме в цій конфігурації.

У нижньому поясі спостерігається аналогічна тенденція: найбільше стискуюче зусилля також припадає на схему №2, тоді як максимальне розтягувальне — на схему №3. Це вказує на те, що нижній пояс загалом працює в умовах значніших стискуючих впливів порівняно з верхнім, що є характерним для елементів, які сприймають згинальний момент.

Похили та вертикальні елементи решітки (розкоси) проявляють змішаний характер роботи: у різних схемах вони зазнають як суттєвих стискуючих, так і розтягувальних сил. Найбільше розтягувальне зусилля, як і у випадку поясів, спостерігається в схемі №2, тоді як найбільше стискуюче характерне для схеми №3. Це свідчить про вагомую роль конфігурації решітки у формуванні внутрішніх силових потоків.

Узагальнюючи, можна констатувати, що схема №2 є найбільш напруженою в усіх групах елементів, оскільки саме в ній спостерігаються

максимальні значення зусиль різних типів. Схема №3 відзначається підвищеними стискуючими силами в розкосах та значними розтягувальними зусиллями в нижньому поясі. Натомість схема №1 демонструє найменші за величиною силові впливи, що вказує на більш сприятливі умови її роботи порівняно з іншими варіантами.

В таблиці 5.2 наведено максимальні зусилля N в колонах моделей.

Таблиця 5.2 Максимальні зусилля N в колонах моделей

№ схеми	N, [Т]	M <sub>y</sub> , [Т·м]		M <sub>z</sub> , [Т·м]	
1	-343,6	-36,4	37,85	-29,3	28,06
2	-343,7	-44,2	50,73	-42,74	37,26
3	-321	-45,3	48,56	-44,93	45,63

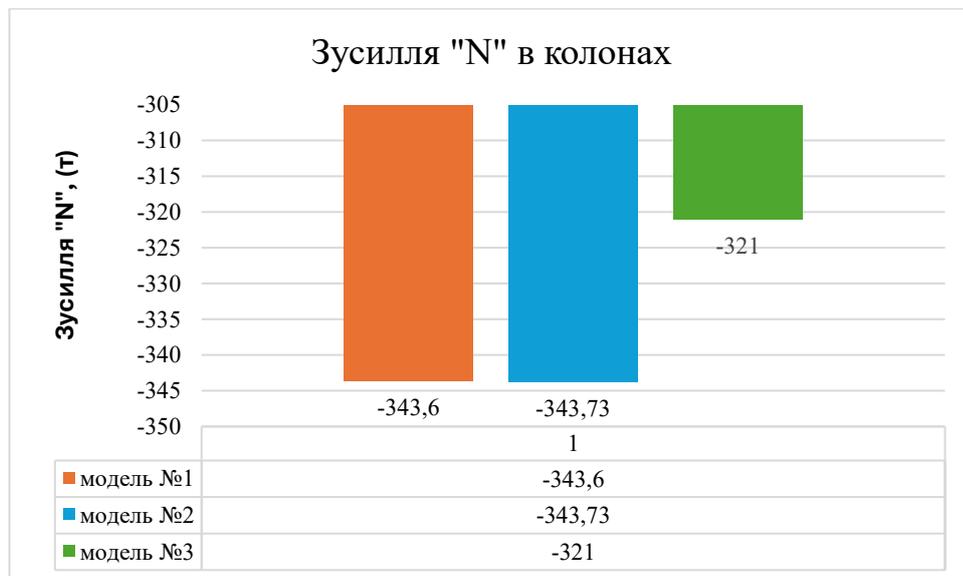


Рис.5.8 Максимальні зусилля "N" в колонах для моделей плит від РСН 2

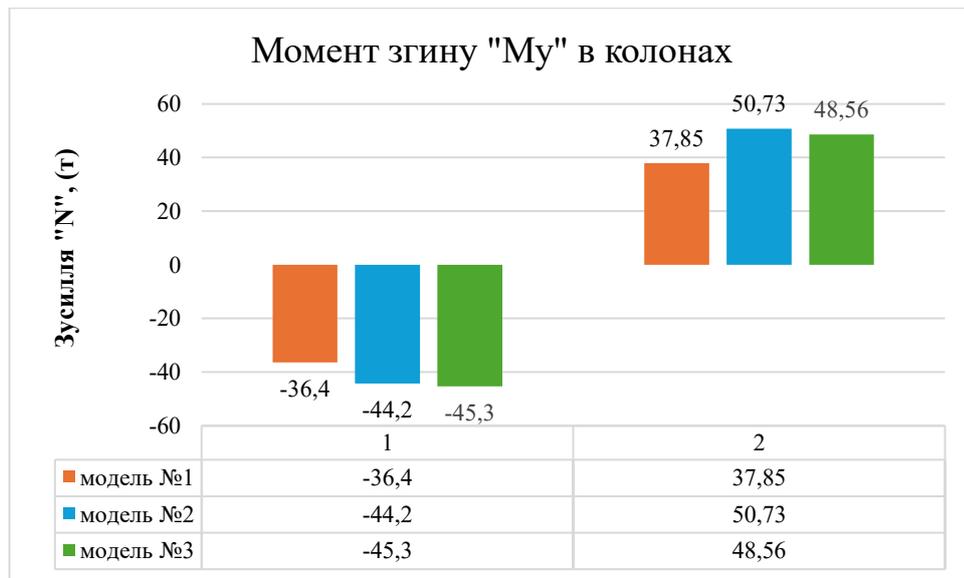


Рис.5.9 Максимальні моменти згину "My" (в площині XOZ) в колонах для моделей структурних плит від РСН 2

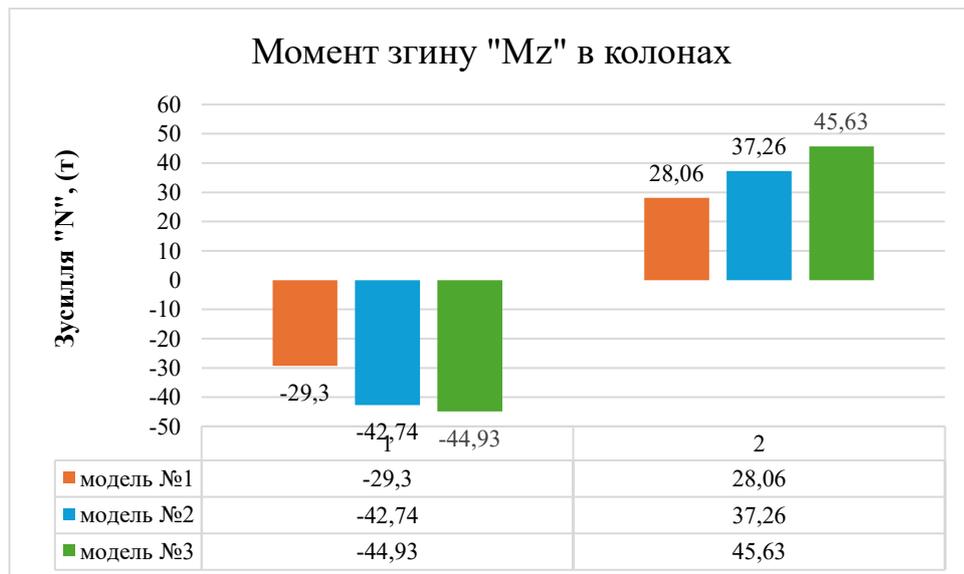


Рис. 5.10 Максимальні моменти згину "Mz" (в площині YOZ) в колонах для моделей структурних плит від РСН 2

Колони, що безпосередньо обрамляють отвір, є найбільш напруженими в порівнянні з колонами, що розташовані по кутам плити. Всі колони працюють у складному напруженому стані, тобто одночасно зазнають як осьового стиску так й вигину в обох вертикальних площинах XOZ та YOZ. Найбільше значення осьової стискаючої сили притаманне для колон за схемою №2, а найменше зусилля N виникає в схемі №3. Але в цій же схемі №3 моменти згину в обох площинах будуть найбільшими в порівнянні з іншими схемами.

### 5.3 Характер деформацій у моделях плит, що аналізуються

У таблиці 5.3 наведено максимальні переміщення вузлів у напрямку осі Z, отримані від дії навантаження РСН2 для розглянутих розрахункових схем плити

Таблиця 5.3 Максимальні переміщення  $f_z$  від РСН 2

$f_z$ , [мм]		
Схема №1	Схема №2	Схема №3
-85	-119	-112

На рис. 5.11 наведено графічне зображення даних, що наведено в таблиці 5.3.

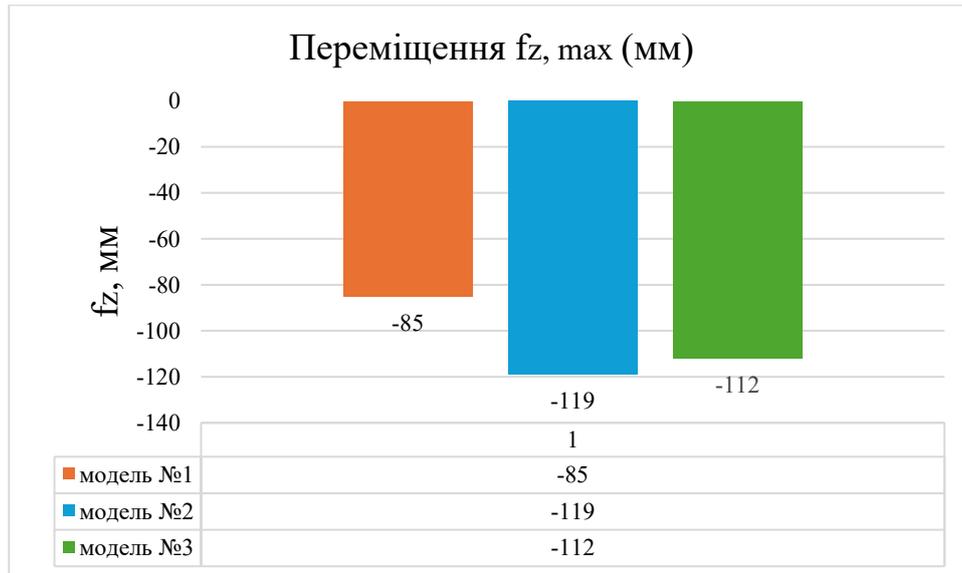


Рис. 5.11 Максимальні переміщення по вертикалі вузлів верхнього поясу розрахункових моделей: для моделі №1 ( $z_{\max}=-85$  мм)-а; для моделі №2 ( $z_{\max}=-119$  мм)-б; для моделі №3 ( $z_{\max}=-112$  мм)-в

На рис. 5.12 наведено епюри максимальних переміщень  $z_1$  стержня нижнього поясу, що є найбільш деформованим для різних моделей структурної плити від РСН2.



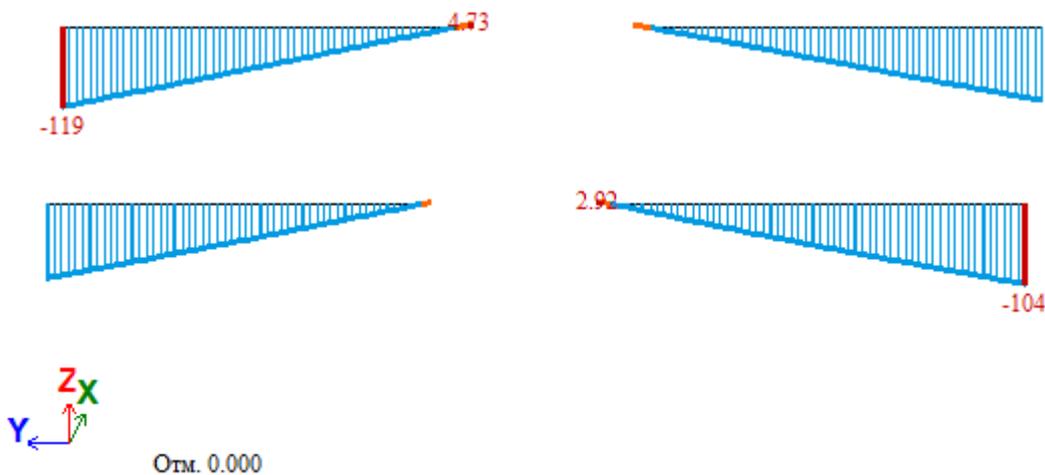


Рис. 5.12 Епюра максимальних прогинів  $f_z$  в площині XOZ стержня верхнього поясу для схеми №1 від РСН 2: для схеми №1-а; для схеми №2-б; для схеми №3-в

На рис. 5.13 наведено мозаїку прогинів  $f_z$  та деформовані схеми від РСН2 для моделей стержньової плити, що досліджується.

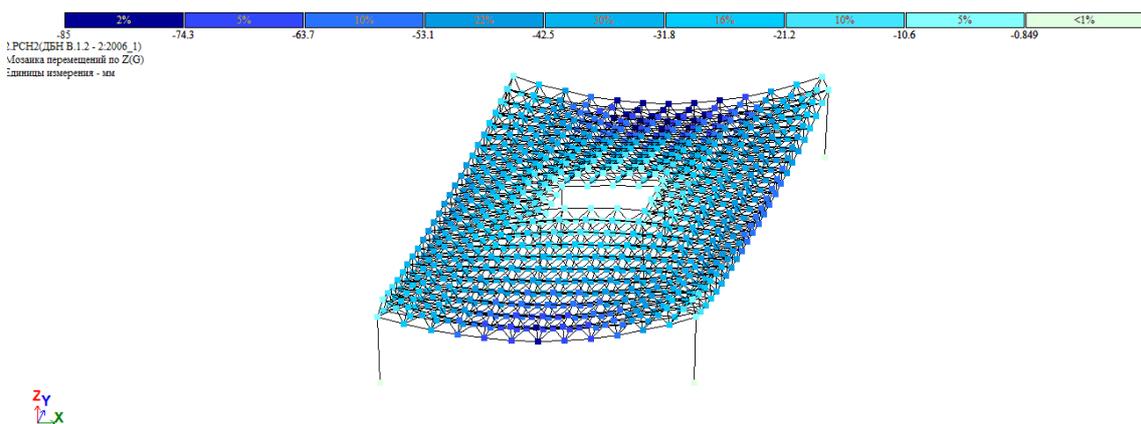


Рис.5.13 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №1 від РСН2

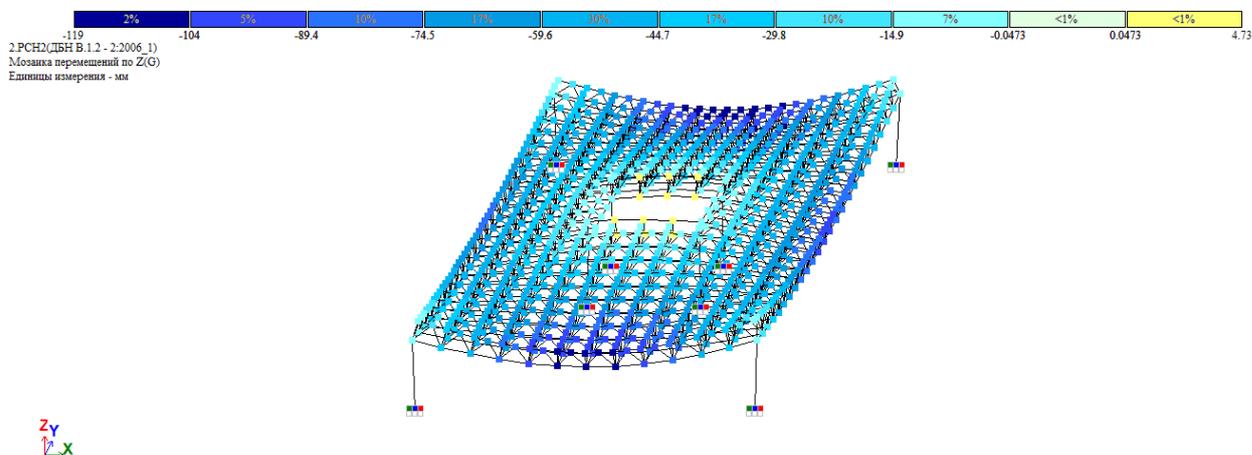


Рис.5.14 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №2 від РСН2

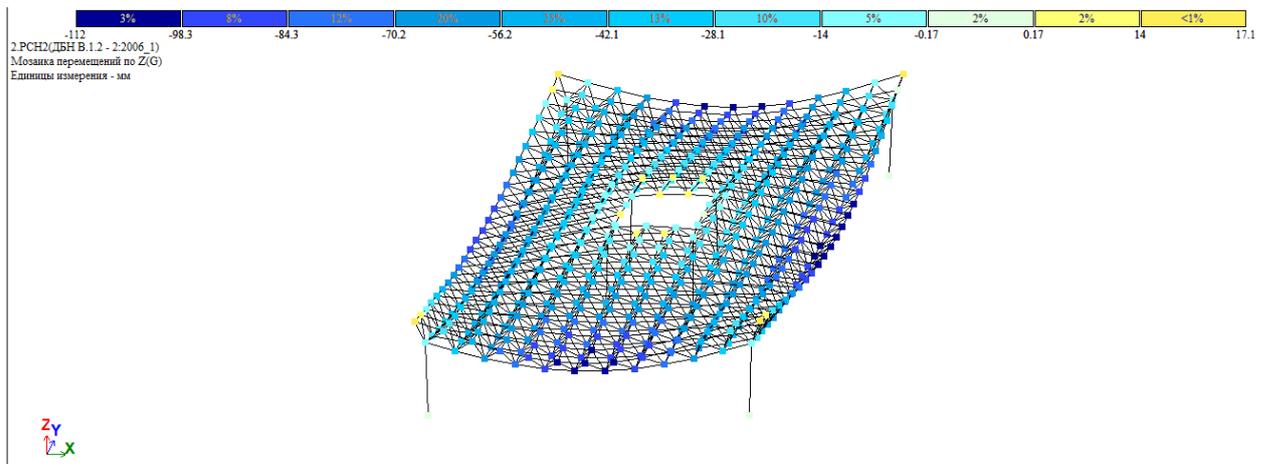


Рис.5.15 Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №3 від РСН2

Всі плити мають однакові розміри в плані, однакове за відстанню та кількістю розташування опор, тому для усіх трьох моделей значення гранично допустимого прогину за нормами [10] буде однаковим та становитиме:

$$f = \frac{L}{250} = \frac{36000}{250} = 144 \text{ мм} \quad (5.1)$$

Як видно з рис. 5.16 та формули (5.1) максимальні прогини моделей структурної плити знаходяться в допустимих межах, тобто не перевищують допустимого значення прогину в 144 мм (14,4 см) (5.1)–(5.3).

Максимальні переміщення вузлів верхнього поясу плит у напрямку осі Z під дією навантаження РСН2 дозволяють оцінити деформативність трьох розглянутих розрахункових схем. Для схеми №1 максимальне переміщення становить -85 мм, що є найменшою величиною серед усіх схем і свідчить про її високу жорсткість. Схема №2 демонструє найбільше переміщення -119 мм, тобто має найвищу деформативність, а схема №3 займає проміжне положення з величиною -112 мм, що означає середню жорсткість.

Відносна деформація у порівнянні з найменшою (схема №1) показує, що схема №2 деформується приблизно на 40% більше, а схема №3 — на 32% більше, ніж схема №1. Таким чином, схема №1 є найжорсткішою, схема №2 — найменш жорсткою, а схема №3 має проміжну жорсткість. Отримані

результати дозволяють зробити висновок, що розрахункові схеми плит по-різному реагують на дію навантаження РСН2, і вибір оптимальної схеми залежить від вимог до допустимих деформацій та загальної жорсткості конструкції.

Оскільки умова жорсткості виконується, далі можна аналізувати результати розрахунку напружено-деформованого стану.

#### **5.4 Аналіз стійкості моделей, що досліджуються**

Стійкість будівельних конструкцій – це властивість зберігати початковий стан рівноваги й не переходити в небезпечний, змінений стан під впливом зовнішніх навантажень. Інакше кажучи, конструкція вважається стійкою, якщо навіть за зростання навантажень або появи невеликих деформацій вона не змінює свою форму, не зміщується, не прогинається, не перекидається та не руйнується внаслідок втрати стійкості.

Стержньові просторові плити — решітчасті, сталеві та фермо-подібні системи — складаються з великої кількості стержнів, що працюють у єдиній просторовій схемі. Для них розрахунок на стійкість є необхідною умовою, оскільки під дією навантажень ці конструкції можуть втратити форму задовго до того, як матеріал досягне межі міцності. У таких системах чимало елементів працюють на стиск: верхні пояси, частина діагоналей, окремі стійки та зв'язки. Саме стиснені стержні найуразливіші до втрати стійкості, і небезпека тут полягає не стільки в перевищенні напружень, скільки в можливому викривленні елемента.

Особливо важливим є врахування стійкості в конструкціях із великими прольотами. Зі збільшенням довжини стержнів і відстаней між вузлами різко зменшується критичне навантаження, за якого можливий боковий вигин або локальне викривлення елемента. Навіть незначне додаткове навантаження може спричинити лавиноподібне руйнування всієї конструкції.

Оскільки просторова плита працює як єдиний цілісний елемент, вихід з ладу навіть одного стержня порушує геометрію вузлів і спричиняє

перерозподіл зусиль, що може викликати прогресуючу втрату стійкості всієї системи. Додатковим фактором ризику є те, що сталеві стержні, попри високу міцність, мають порівняно низьку жорсткість: вони гнучкі, чутливі до початкових недосконалостей і схильні до бокового вигину.

На рис. 5.16-5.18 наведено форми втрати стійкості від РСН2 для моделей структурних плит, що досліджуються.

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма потери устойчивости в гл. с. 1  
Коэффициент 2.01232

а)

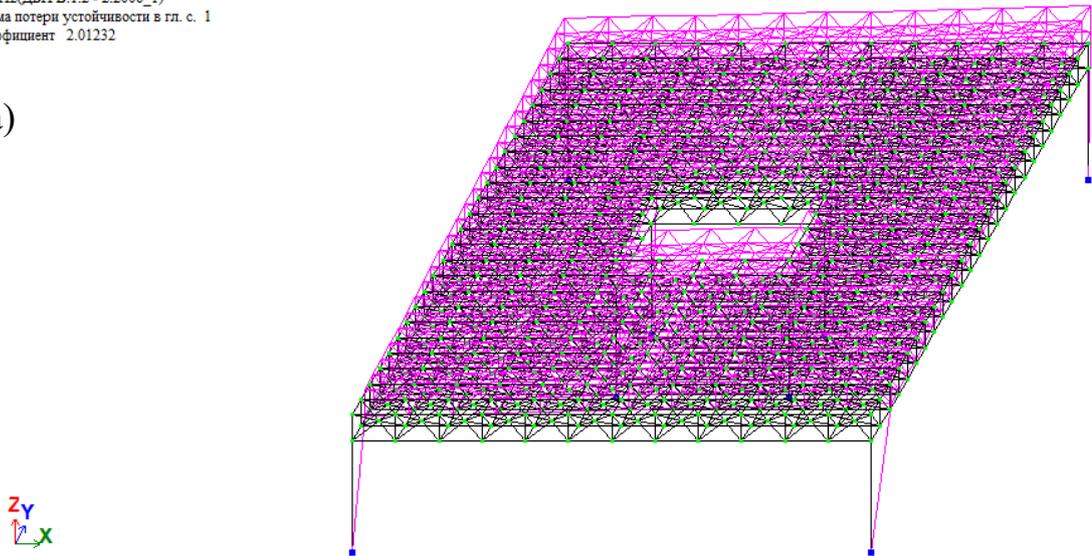


Рис. 5.16 Форма втрати стійкості від РСН2 для схеми №1

2.РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма потери устойчивости в гл. с. 1  
Коэффициент 2.07821

б)

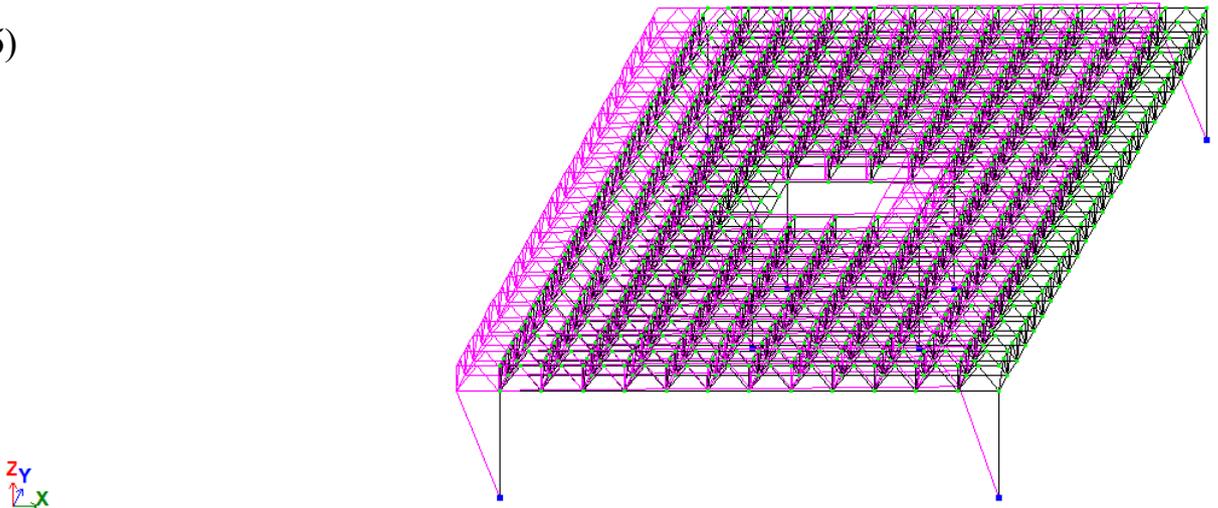


Рис. 5.17 Форма втрати стійкості від РСН2 для схеми №2

в)

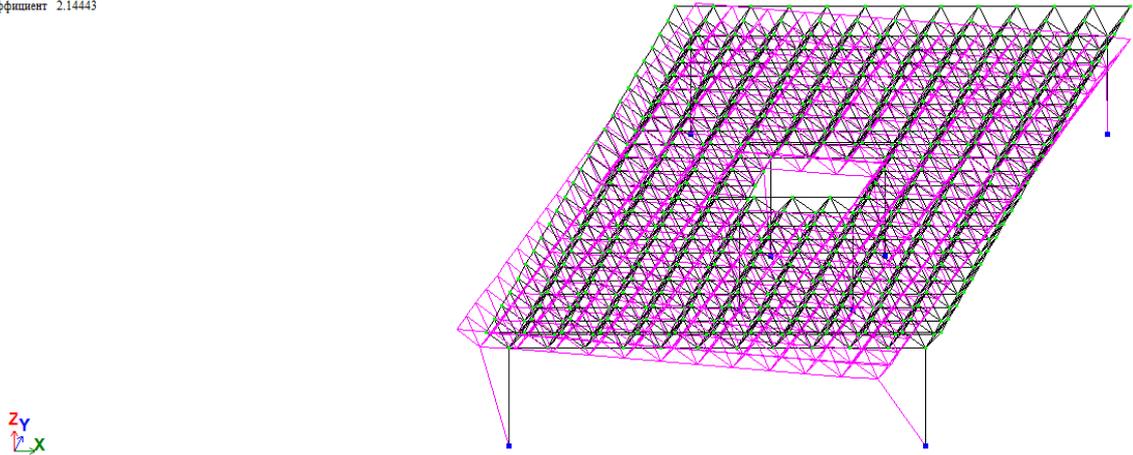


Рис. 5.18 Форма втрати стійкості від РСН2 для схеми №3

У таблиці 5.4 подано значення мінімального коефіцієнта стійкості (за РСН2) для розглянутих моделей плити.

Таблиця 5.4 Коефіцієнт  $n$  стійкості

$n$	Схема №1	Схема №2	Схема №3
	2,01	2,08	2,14

Як видно з таблиці 5.4, для схем плити з базовим елементом 1-го та 2-го типу коефіцієнт стійкості  $n$  є майже однаковим. Трохи більшим - на 7% є значення коефіцієнта стійкості для схеми №3. Отже, формування структури із використанням базового елемента 3-го типу робить конструкцію дещо стійкішою. Хоча, загалом, принципово форма кристалу (базового елемента) не змінює показник стійкості конструкції загалом.

На рис. 5.19 наведено графічне зображення даних з таблиці 5.4

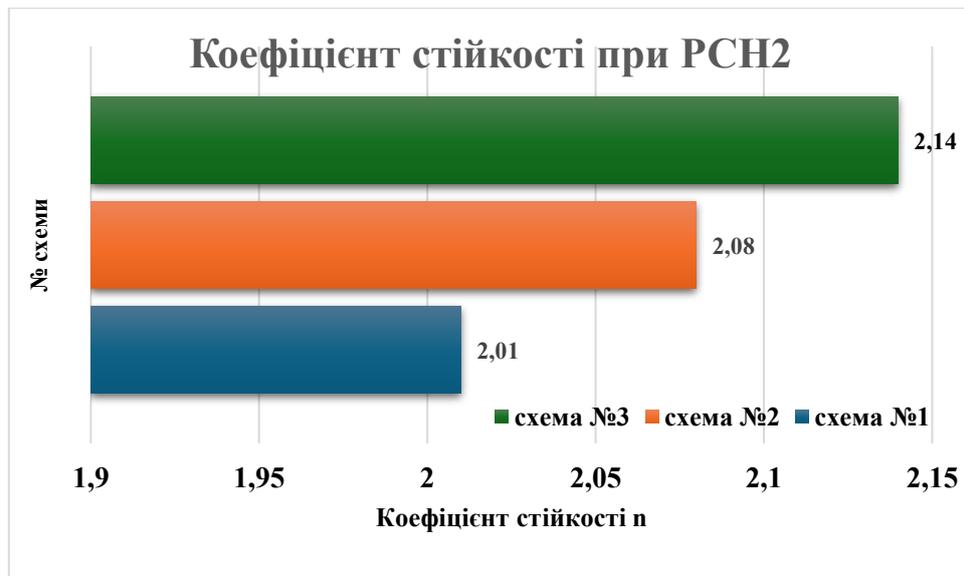


Рис.5.19 Коефіцієнт стійкості  $n$  (мінімальний) від РСН 2

**Висновки по стійкості систем.** Коефіцієнт стійкості 2,0-2,14 для стержньової просторової плити означає, що конструкція здатна витримати навантаження, удвічі більше за те, за якого в розрахунковій моделі настає втрата стійкості. Це свідчить про значний запас міцності: фактичне критичне навантаження у два рази перевищує розрахункове, що забезпечує конструкції резерв для сприйняття додаткових впливів, можливих недосконалостей виготовлення та монтажу, а також нерівномірного розподілу навантажень. За такої величини коефіцієнта плита вважається надійною як щодо локальної, так і щодо загальної втрати стійкості, оскільки її критичний стан настає лише при значно більших зусиллях. Отже, діапазон коефіцієнтів для плит 2,0-2,14 свідчить про високий рівень стійкості усіх конструкцій та безпечні умови їх роботи.

### 5.5 Аналіз використання несучої здатності перерізів стержнів при початкових жорсткісних характеристиках, що задані у вихідних даних

Проведення аналізу використання несучої здатності перерізів стержнів при початкових жорсткісних характеристиках, заданих у вихідних даних, є вкрай важливим етапом проектування просторових плит, оскільки саме він дозволяє об'єктивно оцінити ефективність роботи конструктивних елементів у

реальних умовах навантаження. Такий аналіз дає змогу визначити, яку частину своєї несучої здатності фактично використовують різні групи стержнів у кожному з розрахункових варіантів. Це, у свою чергу, дозволяє виявити як перевантажені елементи, що працюють на межі можливостей і потребують підсилення, так і недовантажені, у яких наявний значний резерв міцності й можливе зменшення перерізів з метою оптимізації ваги та матеріаломісткості конструкції. Крім того, такий аналіз є основою для порівняння різних розрахункових схем, оцінки раціональності конструктивних рішень та вибору найбільш ефективної моделі з точки зору надійності, економічності та рівномірності роботи елементів. Таким чином, аналіз використання несучої здатності забезпечує не лише безпеку експлуатації споруди, а й техніко-економічну доцільність прийнятих проектних рішень.

У таблиці 5.5 показано, яку частину несучої здатності перерізів займають різні групи стержнів у трьох варіантах розрахункових схем просторової плити.

Таблиця 5.5 Розподіл несучої здатності по перерізах для різних конструктивних груп стержнів конструкції плити за ІГС при жорсткостях, що прийняти у вихідних даних

Назва конструктивної групи	Несуча здатність перерізу, %		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	36,5	55,3	62,5
Нижній пояс	47,1	62,5	60,5
Решітка	33,8	19,7	24
Колони	126	163	158

На рис. 5.20–5.23 показано візуалізацію даних з таблиці 5.5, що ілюструє рівень використання несучої здатності перерізів для різних груп елементів у аналітичній моделі структурної плити при розрахунку на першою групою граничних станів.



Рис. 5.20 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів верхнього поясу

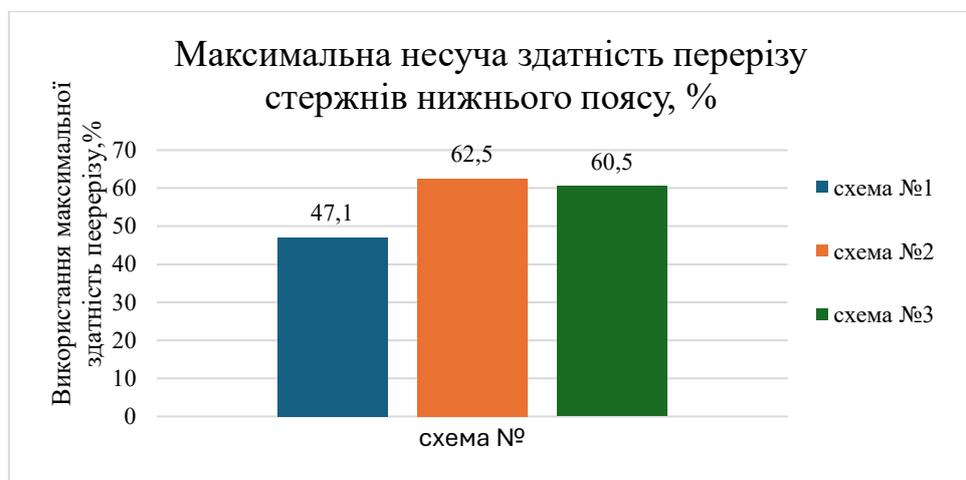


Рис. 5.21 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів нижнього поясу

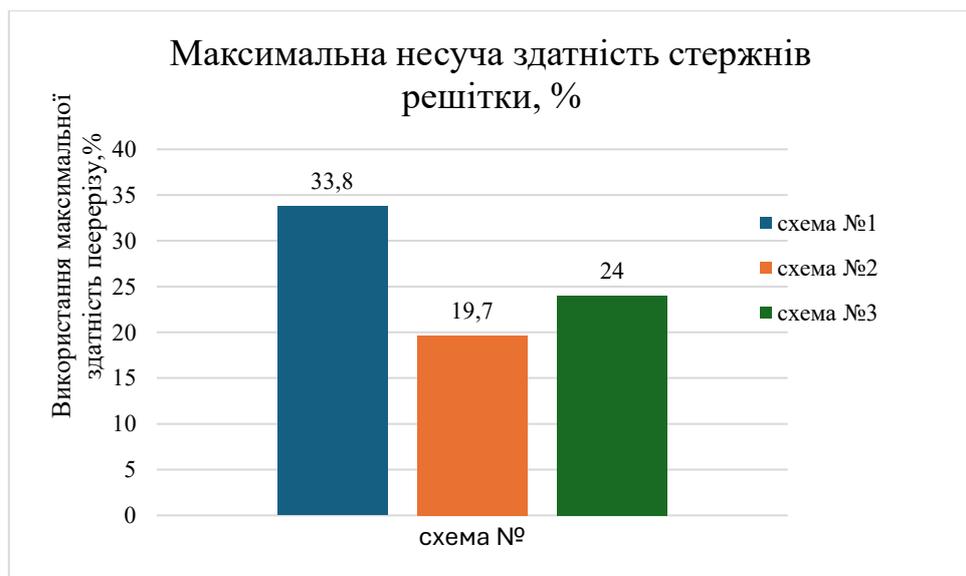


Рис. 5.22 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів решітки

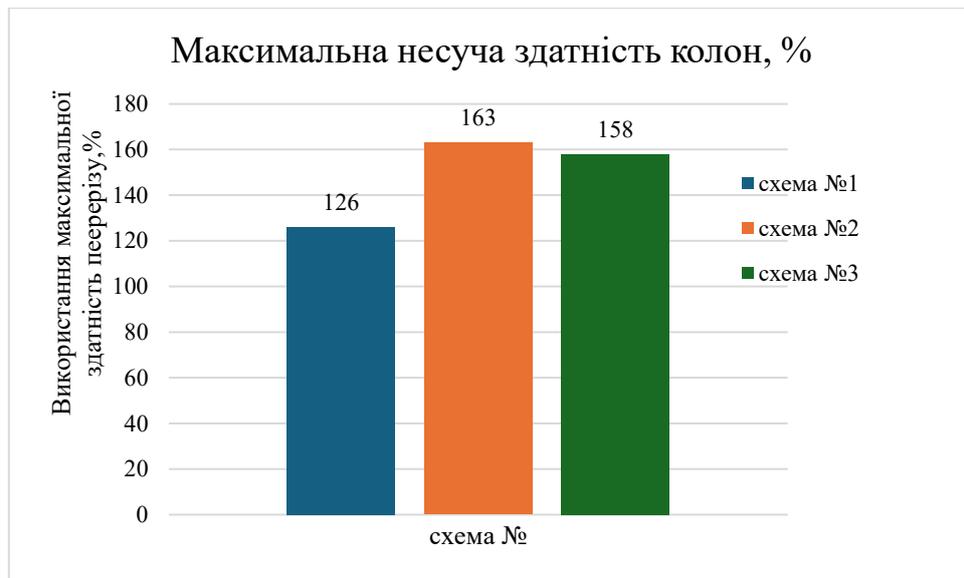


Рис. 5.23 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів колон

На рис. 5.24–5.27 представлені мозаїки результатів розрахунків сталевих елементів за 1ГС із поперечними перерізами, жорсткість яких задана у вихідних даних. Кольорова шкала відображає відсоток використаної несучої здатності перерізу, прийнятий у первинному наближенні.

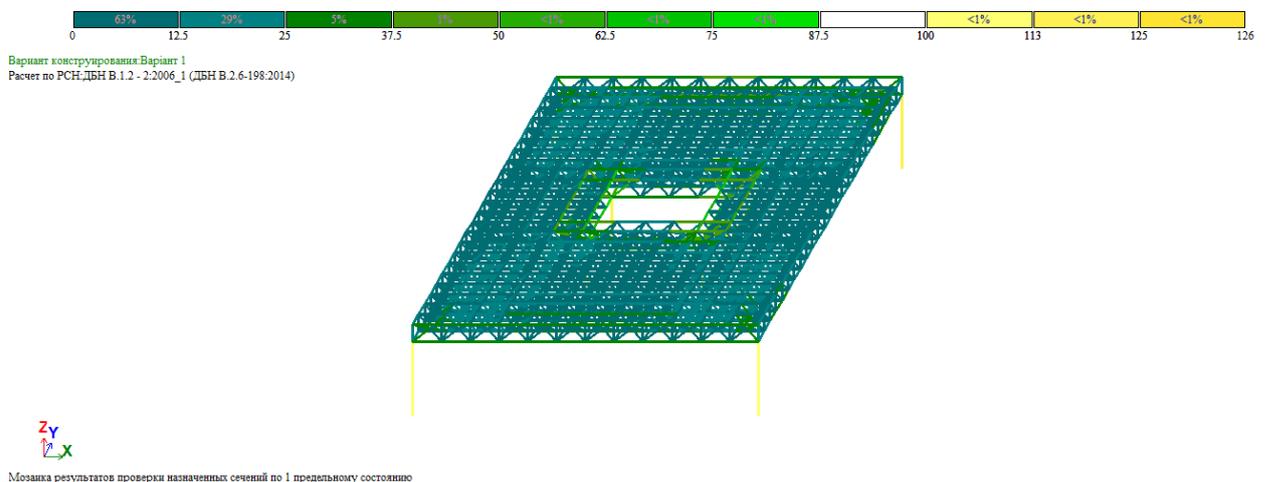


Рис. 5.24 Мозаїка результатів розрахунку за першою групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами, призначеним в вихідних даних, % несучої здатності для схеми №1

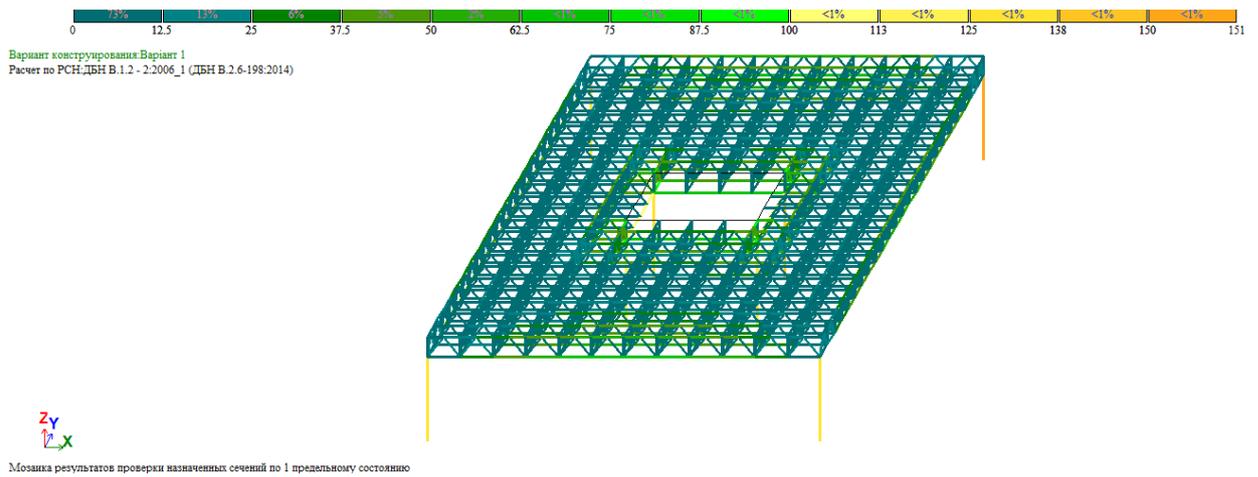


Рис. 5.25 Мозаїка результатів розрахунку за першою групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами, призначеним в вихідних даних, % несучої здатності для схеми №2

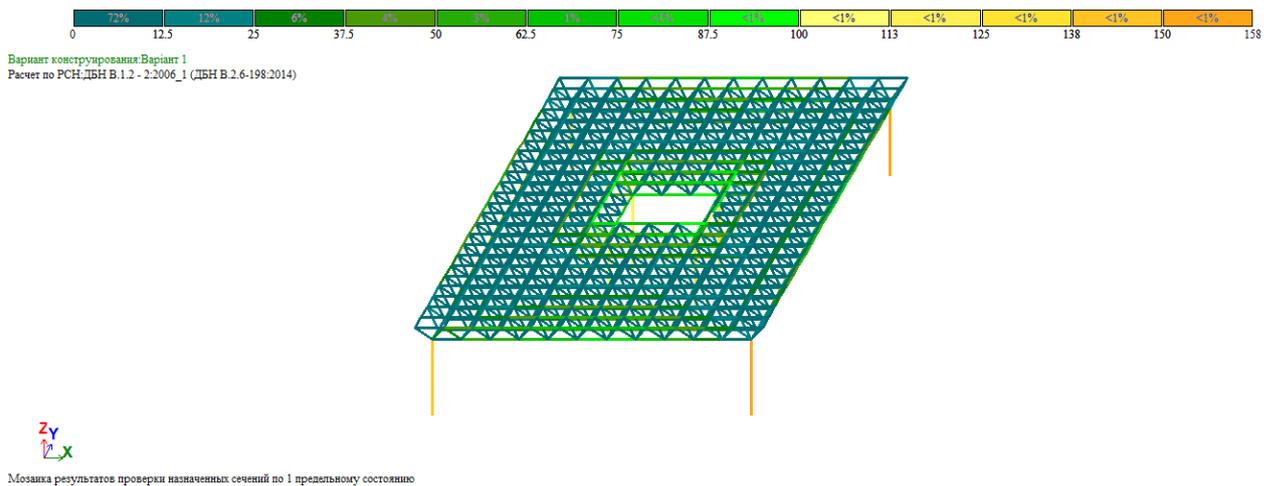


Рис. 5.26 Мозаїка результатів розрахунку за першою групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами, призначеним в вихідних даних, % несучої здатності для схеми №3

## 5.6 Висновки з аналізу ступеня використання перерізів стержнів з урахуванням початково заданих жорсткісних характеристик за першою групою граничних станів

Аналіз використання несучої здатності перерізів різних конструктивних груп стержнів стержньових моделей плит показує наступні особливості. Для верхніх поясів плити ступінь використання перерізу змінюється від 36,5% у

схемі №1 до 62,5% у схемі №3, що свідчить про поступове збільшення навантаження на ці елементи при зміні схеми розташування стержнів. Нижні пояси, навпаки, демонструють досить високий рівень завантаження: від 47,1% у схемі №1 до 62,5% у схемі №2, після чого трохи знижується до 60,5% у схемі №3, що вказує на стабільну участь нижніх поясів у сприйнятті основних згинальних моментів.

Для решітки стержнів ступінь використання несучої здатності залишається відносно низьким: від 19,7% до 33,8%, що свідчить про те, що ці елементи не є критичними щодо несучої здатності плити і мають значний запас міцності.

Найбільш перевантаженими елементами є колони, у яких використання несучої здатності перевищує 100% у всіх схемах (126–163%), що свідчить про потенційну небезпеку втрати стійкості цих стержнів. Це підкреслює необхідність додаткової уваги до стійкості колон і можливого підвищення їх перерізів або жорсткості для забезпечення надійності всієї конструкції.

Таким чином, аналіз показує, що основне навантаження сприймають нижні та верхні пояси, тоді як решітка використовується лише частково, а колони є критично перевантаженими, що визначає пріоритетні напрямки для оптимізації конструкції та підвищення її безпеки.

### **5.7 Ступінь використання перерізів при розрахунках на жорсткість (за 2 групою граничних станів)**

В таблиці 5.6 наведено дані, що відображають розподіл несучої здатності по перерізах при розрахунках щза умовами жорсткості із жорсткостия елментів, що прийнято у вихідних даних.

Таблиця 5.6 Розподіл несучої здатності по перерізах для різних конструктивних груп стержнів конструкції плити за 2ГС при жорсткостях, що прийняти у вихідних даних

Назва конструктивної групи	Несуча здатність перерізу, %		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	13,1	8,8	13,6
Нижній пояс	13,1	13,8	14,5
Решітка	15,6	18,5	20,6
Колони	1,8	1,8	1,8

На рис. 5.27–5.30 показано візуалізацію даних з таблиці 5.6, що ілюструє рівень використання несучої здатності перерізів для різних груп елементів у аналітичній моделі структурної плити при розрахунку за другою групою граничних станів.



Рис. 5.27 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів верхнього поясу в результаті розрахунку за другою групою граничних станів



Рис. 5.28 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів нижнього поясу в результаті розрахунку за другою групою граничних станів

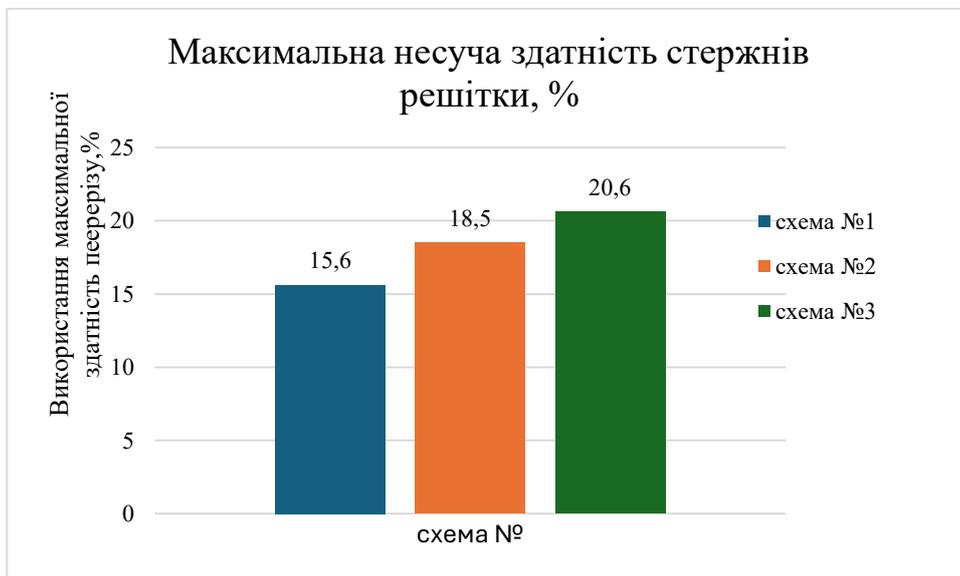


Рис. 5.29 Максимальна несуча здатність перерізу стержнів решітки в результаті розрахунку за другою групою граничних станів

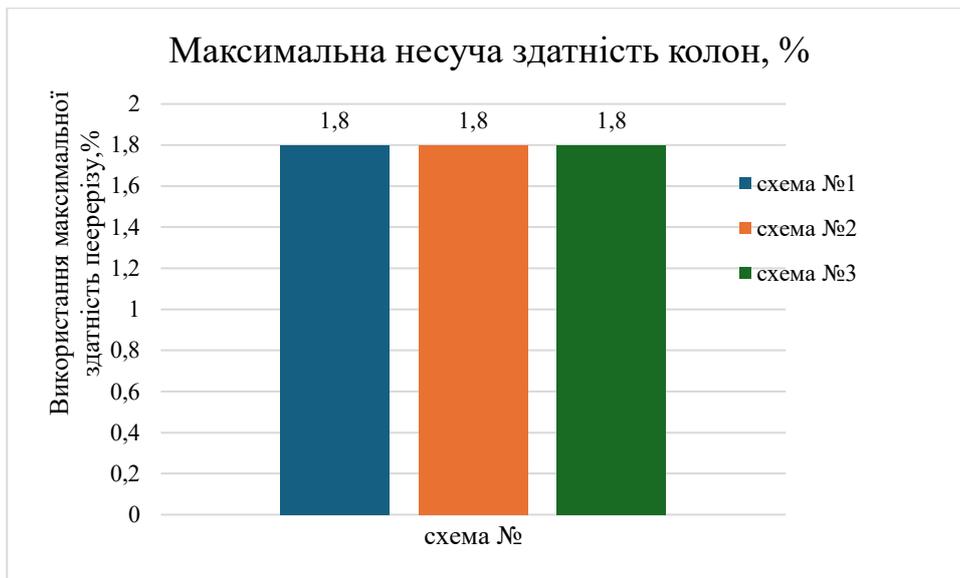
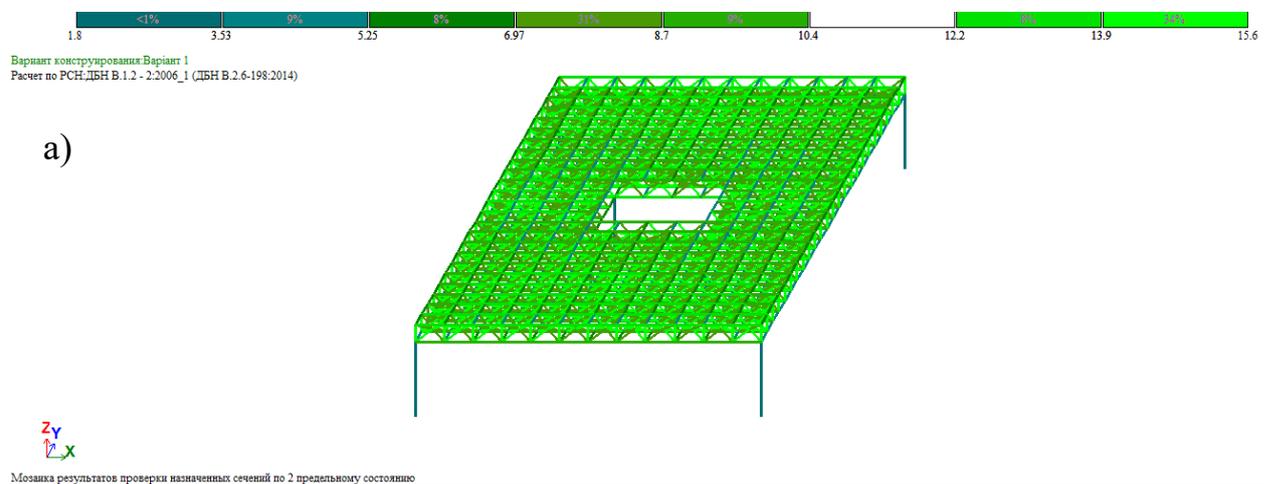


Рис. 5.30 Максимальна несуча здатність перерізу колон в результаті розрахунку на другою групою граничних станів

На рис. 5.31 наведено мозаїку результатів розрахунку за другою групою граничних станів металевих стержнів з жорсткостями, що прийняті у вихідних даних.



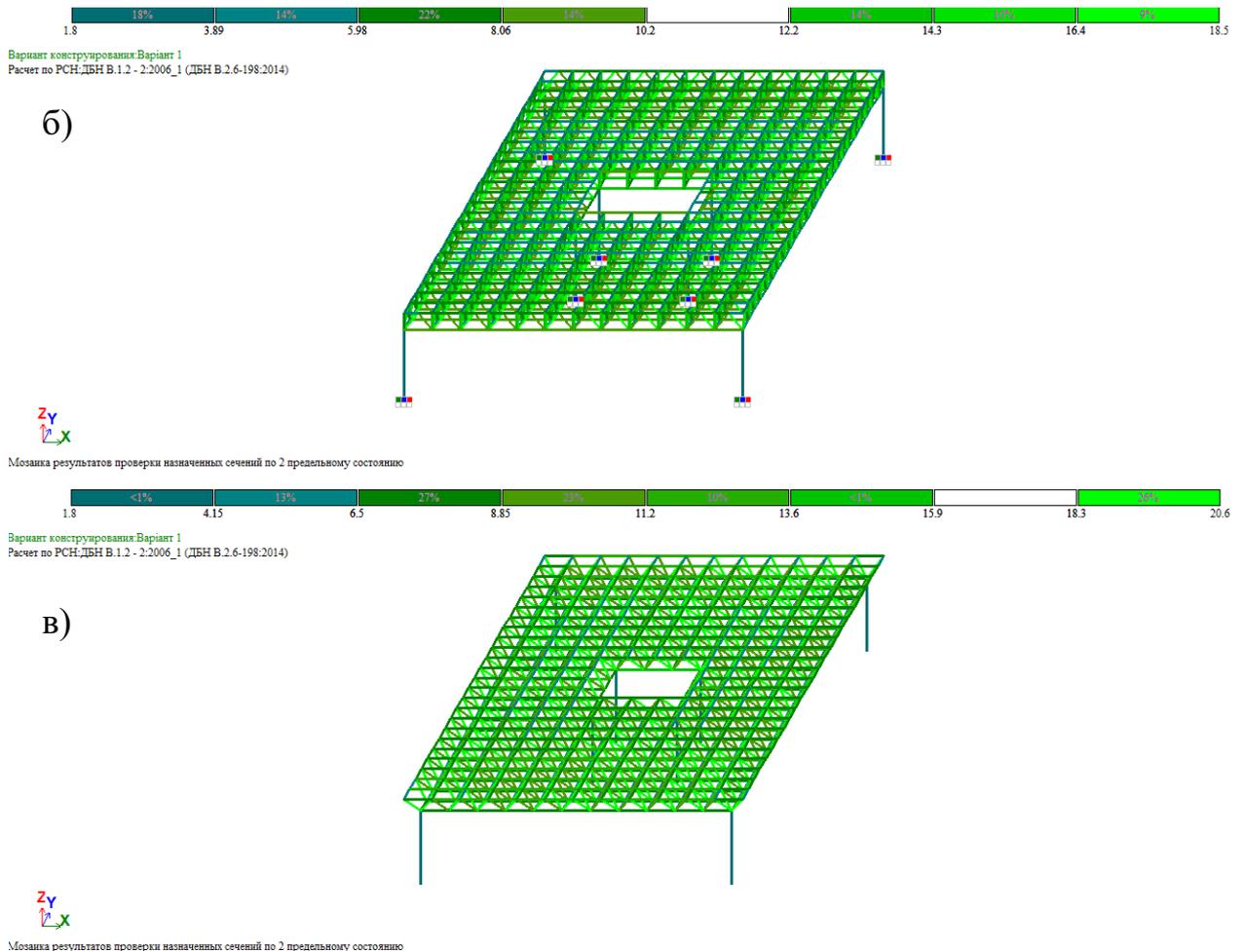


Рис.5.31 Мозаїка результатів розрахунку за другою групою граничних станів металевих стержнів з жорсткостями, що прийняті у вихідних даних: для схеми №1-а; для схеми №2-б; для схеми №3-в

### 5.8 Висновки з аналізу ступеня використання перерізів стержнів з урахуванням початково заданих жорсткісних характеристик за другою групою граничних станів

Наведені в таблиці 5.6 дані відображають ступінь використання жорсткісних характеристик перерізів стержнів для основних конструктивних груп просторової плити за другою групою граничних станів (тобто за деформаціями), при жорсткостях, прийнятих у вихідних даних. Цей показник характеризує, наскільки ефективно кожна група елементів працює з точки зору обмеження переміщень і прогинів, а не з позиції міцності.

Для верхнього поясу ступінь використання жорсткості становить 13,1 % у схемі №1, 8,8 % у схемі №2 та 13,6 % у схемі №3. Найменше використання

жорсткості спостерігається у схемі №2, що означає наявність надмірної жорсткості верхнього поясу при цій конфігурації. У схемах №1 та №3 використання жорсткості дещо вище, але загалом залишається на низькому рівні. Це свідчить про те, що верхній пояс у всіх варіантах має значний резерв по жорсткості та практично не є визначальним елементом у формуванні загальної деформативності плити.

Для нижнього поясу використання жорсткості змінюється від 13,1 % у схемі №1 до 13,8 % у схемі №2 та 14,5 % у схемі №3. Тут також спостерігається невеликий рівень залучення жорсткості, що вказує на достатній запас по обмеженню деформацій. Дещо більше використання у схемі №3 пояснюється тим, що в цій конфігурації більша частина просторових зусиль перерозподіляється через решітку, що активізує роботу нижнього поясу за деформативністю.

Для решітки спостерігається найбільший серед усіх груп рівень використання жорсткості: 15,6 % для схеми №1, 18,5 % для схеми №2 та 20,6 % для схеми №3. Це означає, що саме розкоси відіграють провідну роль у забезпеченні просторової жорсткості плити, особливо у схемі №3, де реалізована об'ємно-просторова система багатоспрямованих діагоналей. Зі зростанням складності та просторовості решітки її внесок у загальну жорсткість конструкції закономірно зростає.

Для колон значення використання жорсткості однакове для всіх трьох схем і становить лише 1,8 %. Це свідчить про те, що за другою групою граничних станів колони майже не впливають на загальну деформативність системи, а їх жорсткість є істотно завищеною відносно потреб плити. Фактично колони працюють як майже абсолютно жорсткі опори у задачі обмеження переміщень.

Усі конструктивні групи стержнів працюють із дуже значним запасом по жорсткості, оскільки максимальне використання не перевищує 20,6 %. Найбільший внесок у формування деформативності плити забезпечує **решітка**, особливо у схемі №3, що підтверджує ефективність просторових

діагональних зв'язків у підвищенні жорсткості. Верхній і нижній пояси мають надлишкову жорсткість у всіх схемах, а колони практично не беруть участі у формуванні прогинів.

Отримані результати свідчать, що з точки зору другої групи граничних станів структура має великий потенціал для подальшої оптимізації жорсткостей, тобто можливе зменшення перерізів окремих груп елементів без порушення умов допустимих переміщень. Якщо потрібно, можна ще окремо пов'язати ці результати з реальними прогинами схем №1–№3.

### 5.9 Підбір нових профілів в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР

В таблиці 5.7 наведено результати автоматизованого підбору за нормами [9] нових профілів тркбчатих перерізі для усіх груп конструктивних стержнів.

Таблиця 5.7 Оновлені типи перерізів елементів структурних плит для різних варіантів рішення

№ схеми	Переріз (профіль труби), прийнятий при першій ітерації	Переріз, підібраний ПК Ліра-САПР за результатами статичного розрахунку		
		№ типу перерізу в ПК Ліра-САПР	Сталь	Профіль труби
<i>Верхній пояс</i>				
1	ТБ 273x15	112	С 235	ТБ273x9
2	ТБ 273x15	170	С 235	ТБ 245x20
3	ТБ 273x15	148	С 235	ТБ 299x13
<i>Нижній пояс</i>				
1	ТБ 273x15	334	С 235	ТБ 273x6,5
2	ТБ 273x15	525	С 235	ТБ 245x20
3	ТБ 273x15	413	С 235	ТБ 273x9,5
<i>Решітка</i>				
1	ТБ 219x30	657	С 235	ТБ 219x8

2	ТБ 219х30	759	С 235	ТБ 245х7,5
3	ТБ 219х30	617	С 235	ТБ 245х15
<i>Колони</i>				
1	ТБ 630х9	220	С 235	ТБ 720х10
2	ТБ 630х9	390	С 235	ТБ 820х9,5
3	ТБ 630х9	266	С 235	ТБ 820х9,5

В таблицях 5.8-5.12 наведено результати підрахунку ваги конструктивних груп стержнів для моделей, що досліджуються.

Таблиця 5.8 Вага верхнього поясу  
(Труби сталеві електрозварні за [15])

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	46	С235	ТБ273х9	0,0586	1314	<b>77,00</b>
2	52	С235	ТБ 245х20	0,111	1314	<b>145,85</b>
3	24	С235	ТБ 299х13	0,0917	1314	<b>120,49</b>

Таблиця 5.9 Вага нижнього поясу  
(Труби сталеві електрозварні за [15])

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	24	С235	ТБ 273х6,5	0,0427	1314	<b>56,11</b>
2	24	С235	ТБ 245х20	0,111	1314	<b>145,85</b>
3	12	С235	ТБ 273х9,5	0,0617	1167	<b>72,00</b>

Таблиця 5.10 Вага стержнів решітки  
(Труби сталеві електрозварні за [15])

№ схеми	№ типу перерізу	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	69	С235	ТБ 219х8	0,0416	4277,19	<b>177,93</b>
2	89	С235	ТБ 245х7,5	0,0439	3005,27	<b>131,93</b>
3	39	С235	ТБ 245х15	0,0851	2716,06	<b>231,14</b>

Таблиця 5.11 Вага колон  
(Труби сталеві електрозварні за [15])

№ схеми	№ типу перерізу	Сталь	Профіль труби	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина, м	Кількість колон в моделі, шт	Загальна вага колон в моделі, т
1		С 235	ТБ 720x10	0,18	7,8	8	<b>10,93</b>
2		С 235	ТБ 820x9,5	0,19	7,8	8	<b>11,85</b>
3		С 235	ТБ 820x9,5	0,19	7,8	8	<b>11,85</b>

Загальну вагу просторової стержньової плити разом із колонами визначено на основі розрахунків, зведених у таблицю 5.12.

Таблиця 5.12 Вага моделей конструкції плити

№ схеми	Верхній пояс	Нижній пояс	Розкоси	Вага структурної плити	Колони	Всього вага, т	% структурної плити в загальній вазі моделі
1	77,0004	56,1078	177,93	311,04	10,93	321,97	3,51
2	145,854	145,854	131,93	423,64	11,85	435,49	2,8
3	120,4938	72,0039	231,14	423,63	11,85	435,48	2,8

Рисунки 5.33–5.35 демонструють, як змінюється маса окремих типів елементів у різних варіантах моделі – зокрема для верхнього та нижнього поясів, елементів решітки й колон.

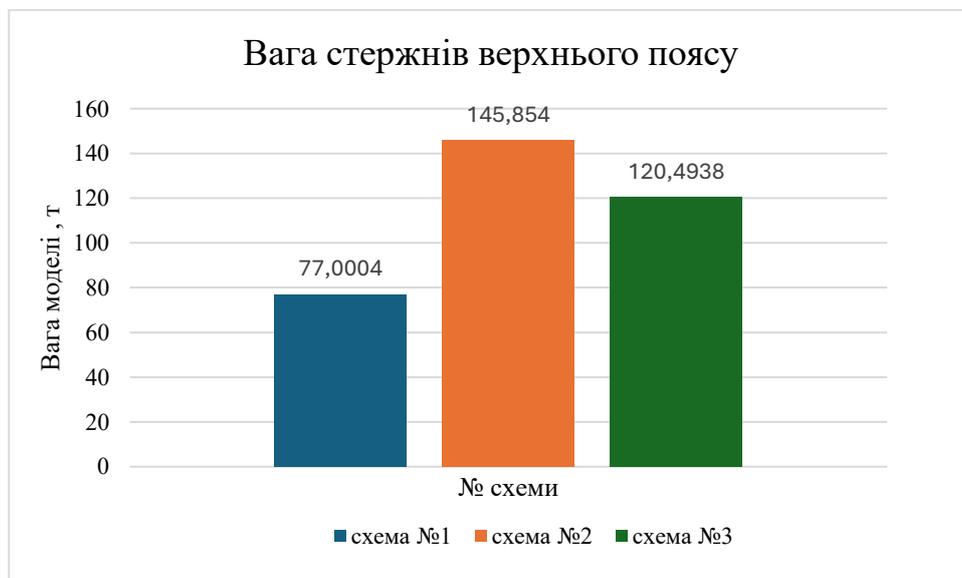


Рис. 5.32 Зміна ваги стержнів верхнього поясу



Рис. 5.33 Зміна ваги стержнів нижнього поясу

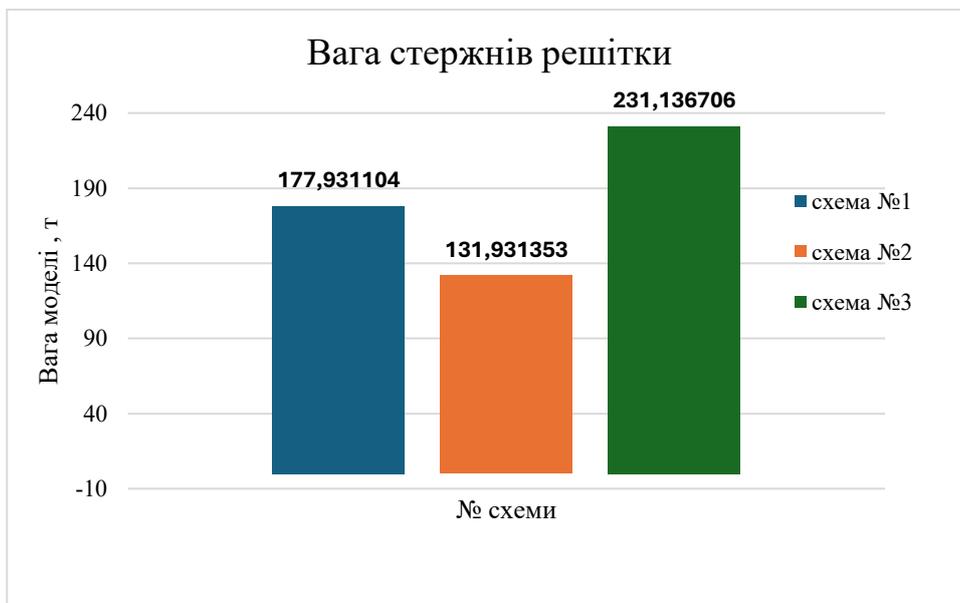


Рис. 5.34 Зміна ваги стержнів решітки

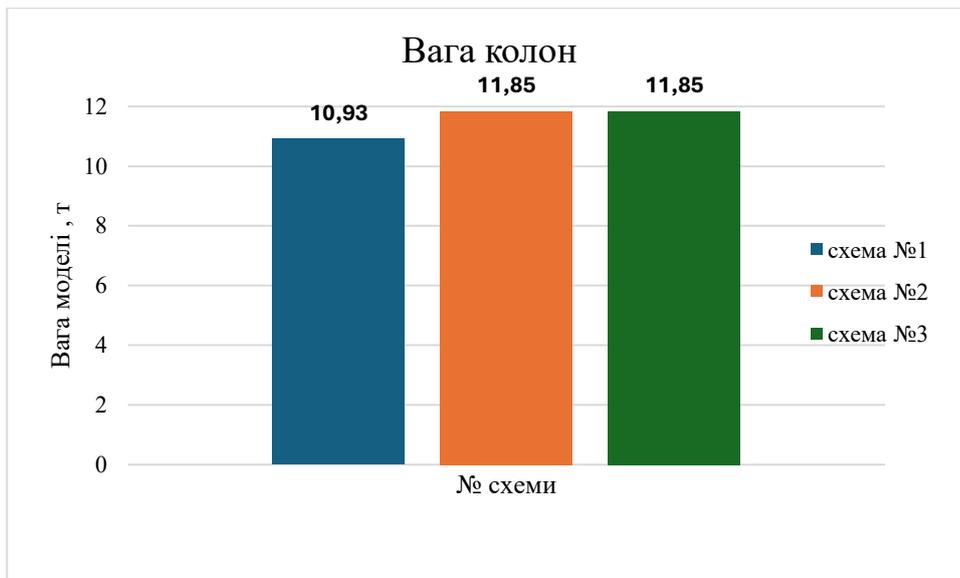


Рис. 5.35 Зміна ваги колон

Рис. 5.36 ілюструє співвідношення ваги плити та ваги колон у конструкції.

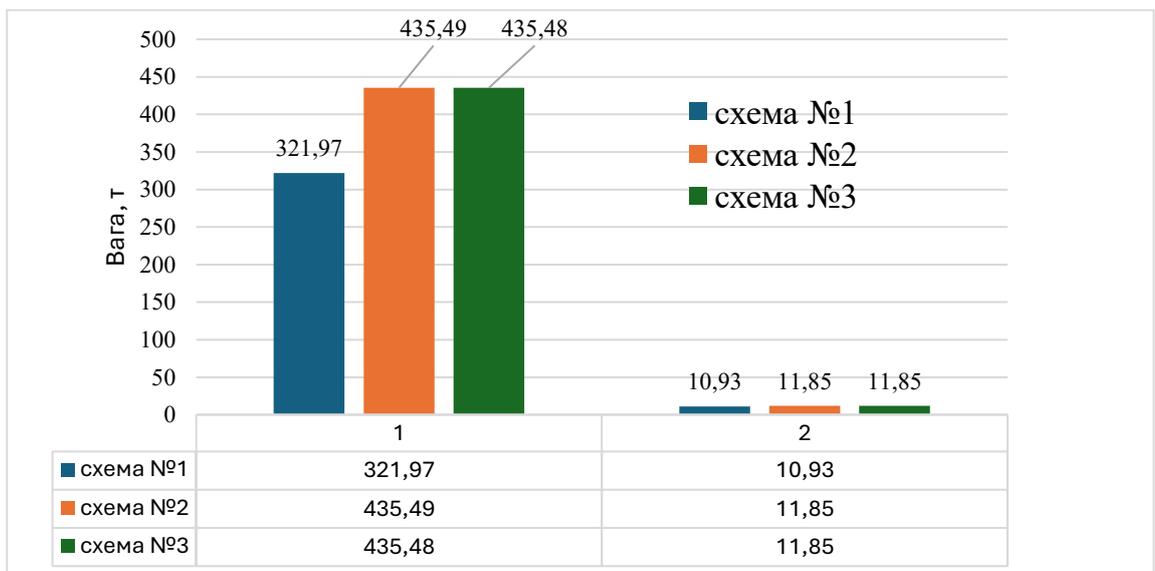


Рис. 5.36 Загальна вага моделі та вага колон в складі моделі

Аналіз ваги конструктивних елементів трьох моделей плит показує суттєві відмінності у розподілі ваги та загальній вазі моделей. Верхній пояс у схеми №1 має найменшу вагу – 77,0 т, тоді як у схеми №3 він важить 120,5 т, а у схеми №2 — 145,85 т. Нижній пояс також найлегший у схеми №1 – 56,1 т, середній у схеми №3 – 72,0 т і найбільший у схеми №2 м 145,85 т, причому у схеми №2 вага верхнього і нижнього поясів однакова, що свідчить про більш

масивну і симетричну конструкцію. Розкоси у схеми №1 важать 177,93 т, у схеми №2 – 131,93 т, а у схеми №3 – 231,14 т, тобто у схеми №3 значна частка загальної маси припадає саме на розкоси, що впливає на розподіл навантажень і жорсткість плити.

Загальна вага структурної плити у схеми №1 становить 311,04 т, тоді як у схем №2 та №3 вона майже однакова – 423,6 т. Вага колон практично не відрізняється між схемами і коливається в межах 10,9–11,85 т, тому основні відмінності у загальній масі моделей визначаються саме вагою плити. Повна вага моделі схеми №1 становить 321,97 т, у схем №2 – 435,49 т, а у схеми №3 – 435,48 т. Частка структурної плити у загальній вазі моделі найвища у схеми №1 – 3,51%, тоді як у схем №2 та №3 вона становить 2,8%. Це свідчить про те, що у схеми №1 плита відносно компактна і ефективно використовує матеріал, тоді як у масивніших схем №2 та №3 загальна маса моделі більше, і частка плити у загальній вазі дещо менша.

Отже, схема №1 є найлегшою моделлю, що забезпечує економію матеріалів, але потенційно має менший запас міцності. Схеми №2 та №3 мають майже однакову загальну масу, проте розподіл ваги елементів різний: у схеми №2 більша частка маси зосереджена у верхньому та нижньому поясах, тоді як у схеми №3 основна маса припадає на розкоси. Вибір оптимальної моделі плити повинен враховувати баланс між вагою конструкції та її жорсткістю: легші плити економічніші, але можуть мати більші прогини під навантаженням, а масивніші забезпечують підвищену жорсткість і стабільність конструкції.

### **5.10 Аналіз впливу форми базового елемента впливає на вагу конструктивних груп елементів**

Узагальнення зіставлення форм базових елементів зі схемами плит показує чіткий причинно-наслідковий зв'язок між геометрією конструктивного елемента, характером роботи стержнів і кінцевою вагою структурної плити. Схема №1 відповідає Х-подібному симетричному

елементу, в якому діагоналі формують ефективну ферменну систему та працюють переважно на розтяг і стиск. Завдяки симетрії досягається рівномірний розподіл зусиль і деформацій, що дозволяє застосовувати відносно тонкі пояси. Це безпосередньо відображається у найменшій вазі верхнього та нижнього поясів (77,00 т і 56,11 т відповідно), помірній вазі розкосів (177,93 т) та найменшій загальній вазі плити — 311,04 т. Таким чином, схема №1 є найекономнішою з точки зору матеріаломісткості.

Схема №2 відповідає конусоподібному (розкритому) елементу, в якому значна частина навантаження концентрується у вузлах та в зоні вершини. Така геометрія вимагає підсилених поясів і вузлових елементів для надійної передачі зусиль та запобігання локальним перевантаженням. Це проявляється у значній вазі верхнього та нижнього поясів – по 145,854 т кожен, при відносно меншій масі розкосів – 131,93 т. Загальна вага плити у цій схемі становить близько 423,64 т. Отже, збільшення маси поясів є прямим наслідком вузлової концентрації зусиль, характерної для конусоподібної геометрії.

Схема №3 відповідає об'ємно-просторовій схемі з багатоспрямованими діагоналями, тобто модулю тривимірної ферми. Діагоналі, розташовані у всіх площинах, формують велику кількість трикутних контурів і забезпечують ефективний просторовий розподіл зусиль. Проте така форма потребує значної кількості та/або збільшених перерізів укосів, що зумовлює найбільшу вагу розкосів – 231,14 т, при середніх масах поясів (120,494 т і 72,0039 т). Загальна вага плити у схемі №3 практично дорівнює схемі №2 і становить близько 423,63 т.

Причинно-наслідковий зв'язок між формою елементів і ваговими характеристиками безпосередньо зумовлений геометрією перерізів і довжиною стержнів, адже маса кожного елемента визначається співвідношенням  $m = \rho AL$ , де  $\rho$  — щільність матеріалу (сталі),  $A$  — площа перерізу, а  $L$  — довжина стержня. Тому схеми, у яких базові елементи мають більші площі перерізів або більшу сумарну довжину, формують більшу масу

відповідних груп елементів. Саме це пояснює великі маси поясів у схемі №2 та домінування маси розкосів у схемі №3.

Форма базового елемента визначає не лише масу, а й розподіл жорсткості конструкції. Порівняння з результатами деформативності показує, що велика вага не завжди гарантує мінімальний прогин. Так, схема №2, маючи наймасивніші пояси, демонструє найбільший прогин, що свідчить про нераціональний просторовий розподіл жорсткості через недостатню ефективність системи діагоналей. Водночас об'ємно-просторова схема №3 з потужними розкосами забезпечує краще розсіювання зусиль у трьох напрямках і має проміжні значення прогинів, хоча й за рахунок зростання матеріаломісткості.

В об'ємно-просторовій схемі №3 навантаження рівномірніше розподіляється між великою кількістю стержнів, але сумарний об'єм сталі у розкосах при цьому істотно зростає.

Аналіз частки плити в загальній вазі моделі показує, що схема №1, маючи найменшу абсолютну вагу плити, водночас має і найбільшу її частку у загальній вазі — 3,51 %, оскільки інші конструктивні елементи тут також відносно легкі. У Схем №2 і №3 плити значно важчі, однак загальна вага моделей зростає ще інтенсивніше, тому відносна частка плити зменшується до 2,8 %.

Отже, форма базових елементів безпосередньо визначає, у яких зонах конструкції концентрується матеріал і жорсткість. Х-подібна симетрична схема забезпечує мінімальну вагу та економне використання сталі, конусоподібна схема потребує масивних поясів через концентрацію зусиль у вузлах, а об'ємно-просторова схема вимагає значних витрат матеріалу на розкоси через велику кількість просторових діагоналей. Саме ці закономірності пояснюють розподіл ваги за групами елементів у таблиці 5.7 та її взаємозв'язок із деформативністю конструкції, зафіксованою у таблиці 5.3.

## РОЗДІЛ 6

### ВИСНОВКИ

1. **Досягнення поставленої мети дослідження.** У рамках роботи повністю досягнуто мети дослідження – виконано числові дослідження напружено-деформованого стану, здійснено конструктивний розрахунок та оптимізаційний підбір перерізів усіх конструктивних груп стержнів для трьох моделей структурної плити, які відрізняються виключно формою базового елемента.

2. **Вплив форми базового елемента на напружено-деформований стан.** Встановлено, що форма кристалічного елемента істотно впливає на характер внутрішніх зусиль, деформативність та матеріалоємність конструкції. При однакових габаритах і навантаженнях схеми демонструють принципово різний розподіл силових потоків у поясах, розкосах та колонах.

3. **Характер роботи стержневих елементів.** У всіх схемах верхні та нижні пояси працюють у складному напруженому стані зі змінним знаком зусиль, при цьому:

- найбільш напруженою є схема №2;
- схема №3 характеризується підвищеними стискуючими зусиллями в розкосах і великим розтягом у нижньому поясі;
- схема №1 працює в найбільш сприятливих умовах з мінімальними зусиллями.

4. **Робота колон.** Колони в усіх схемах перебувають у складному напруженому стані, який характеризується осьовим стиском та згином (виникнення моментів згину в двох площинах). Найбільші осьові зусилля виникають у схемі №2, а найбільші згинальні моменти – у схемі №3. При цьому фактичне використання несучої здатності колон перевищує 100%, що вказує на їх критичність і необхідність підсилення.

5. **Жорсткість і деформативність конструкцій.** Усі три схеми задовольняють умову жорсткості за нормативами. Встановлено, що:

- схема №1 є найжорсткішою (прогин -85 мм);

- схема №2 — найбільш деформативною (-119 мм, +40% до схеми №1);
- схема №3 має проміжну жорсткість (-112 мм, +32% до схеми №1).

Отже, форма базового елемента безпосередньо впливає на загальну деформативність плити.

**6. Загальна просторова стійкість.** Для всіх схем отримано високі значення коефіцієнта стійкості в межах 2,0–2,14, що свідчить про двократний запас стійкості конструкцій. При цьому схема №3 має дещо вищу стійкість, однак загалом форма кристалу не є визначальним фактором стійкості всієї системи.

**7. Несуча здатність конструктивних груп елементів.** Основне навантаження сприймають верхній і нижній пояси, решітка має значний запас міцності, а колони є найбільш перевантаженими. Це визначає пріоритетні напрямки подальшої оптимізації — посилення колон та більш раціональне використання розкосів.

**8. Матеріалоємність та маса конструкцій.**

Найменшу загальну вагу має схема №1 (321,97 т), що робить її найекономнішою. Схеми №2 та №3 мають майже однакову масу (~435,5 т), однак різний її розподіл:

- у схемі №2 основна маса зосереджена в поясах,
- у схемі №3 – у розкосах.

Таким чином, форма базового елемента безпосередньо визначає, де саме концентрується матеріал у конструкції.

**9. Співвідношення «жорсткість – вага – напруженість».** Схема №1 є найекономнішою та найжорсткішою, схема №2 – найбільш напруженою та деформативною, а схема №3 – компромісним варіантом між жорсткістю, стійкістю та масою.

**10. Практичне значення результатів.** Отримані результати підтверджують, що вибір форми базового елемента є одним із ключових факторів, який визначає:

- рівень напруженості елементів,

- величину прогинів,
- матеріалоемність,
- ефективність використання перерізів.

Це дозволяє обґрунтовано застосовувати результати роботи при проектуванні просторових стержньових структур з урахуванням вимог до жорсткості, економічності та надійності.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Chilton J. (1999). *Space Grid Structures*. Routledge  
<https://doi.org/10.4324/9780080498188>
2. Ashtul S.A. & Patil S.N. (2020). Review on Study of Space Frame Structure System. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(4)
3. Space Frame Structure; an analysis of its benefit by Constro Facilitator. Retrieved from: <http://surl.li/ogzyc>
5. Лучко, Й.Й., Назаревич, Б.Д., Ковальчук, В.В. Конструкції будівель і споруд : підруч. / Й.Й. Лучко, Б.Д. Назаревич, В.В. Ковальчук. — Київ : Каменяр, 2018. — 745 с.
6. Makowski, Z. S. *Raumliche Tragwerke aus Stahl*. Düsseldorf, 1963.
7. Murtha-Smith E. & Bean J.E. (1989). Double Layer Grid Space Frame Buckling. *International Journal of Space Structures*, 4(3),117-127  
<https://doi.org/10.1177/026635118900400301>
8. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Space frame". *Encyclopedia Britannica*, Retrieved from: <http://surl.li/ogzxo>
9. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування
10. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. ПРОГИНИ І ПЕРЕМІЩЕННЯ Вимоги проектування
11. Oztoprak, O., Paolini, A., D'Acunto, P., Rank, E., & Kollmannsberger, S. Two-scale analysis and design of spaceframes with complex additive manufactured nodes. *arXiv Preprint* 2301.06921, 2023.
12. Hanaor, A. *Fundamentals of Space Structures*. 2nd ed. London: Routledge, 2017. 322 p.
13. Gioncu, V., & Balut, N. *Stability of Steel Structures: Elastic and Plastic Behaviour*. Berlin: Springer, 2002. 553 p.
14. Kilkelly, M., & Adriaenssens, S. Structural Morphology and Form-Finding of Lightweight Structures. *International Journal of Space Structures*, 2020, 35(2), 155–170.

15. ДСТУ 8943:2019 — «Труби сталеві електрозварні. Технічні умови»
16. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проєктування / Мінрегіонбуд України. – Київ, 2006. – 75 с. (зі змінами)
17. Li Z.X. (2013). Structure Mechanics Analysis with Different Construction Schemes in Large-Span Space Grid Structure. *Advanced Materials Research*, 788, 534–537 . <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.788.534>
18. Мигнцковский М.Ш. Перекрестные фермы, Киев, 1960 г.
19. Kolodezhnov S.N. & Selivanova A.N. (2017). Analysis of suspended structural slab canopy reinforcement systems. *Structural mechanics and structures*, 14, 61-7
20. Huuybrechts S. & Tsai S.W. (1996). Analysis and behavior of grid structures. *Composites Science and Technology*, 56(9), 1001-1015 [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(96\)00063-2](https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00063-2)
21. Zhou Z., Wu J., Meng Sp. et al. (2012). Construction process analysis for a single-layer folded space grid structure in considering time-dependent effect. *International Journal Steel Structures*, 12, 205-217 <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2005-y>
22. Структурні плити конструкції ЦНІСК. URL: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/strukturni-pliti-konstrukcii-cniisk.php>
23. Fu F., Parke G.A.R. (2018). Assessment of the Progressive Collapse Resistance of Double-Layer Grid Space Structures Using Implicit and Explicit Methods. *International Journal Steel Structures*, 18, 831-842 <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0030-1>
24. Flager, F., A. Adya, J. Naymaker and M. Fischer, 2014. *Computers and Structures*, 131, pp. 1-11.
25. Криштоп, Б.Г. Конструкції великопрогонових покриттів для загальних приміщень громадських будівель : навч. посіб. / Б.Г. Криштоп. — Київ : КНУБА, 2008. — 106 с.

26. Sribniak Nataliia Напружено-деформований стан структурної плити / Nataliia Sribniak, Liudmyla Tsyhanenko, Hennadii Tsyhanenko, Serhii Halushka // ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 2 (55). – С. 35-43. – doi:<https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>.
27. Davies, R. M. Space Structures : A Study of Methods and Developments in Three-dimensional Construction / R.M. Davies. — Chichester ; New York: Wiley, 1967. — 1233 p.
28. Space Structures — Proceedings of the International Conference(s). In particular: *Space Structures 5* (постійні збірники доповідей міжнародних конференцій по просторових конструкціях) — (збірник матеріалів конференції, корисний для сучасних методів аналізу/моделювання та кейс-досліджень).
29. Flager, F., A. Adya, J. Naymaker and M. Fischer, 2014. Computers and Structures, 131, pp. 1-11.
30. Space Grid Structures : навч.-практ. довідник : електрон. ресурс. — Без автора. — Без місця вид., без видавця, без дати. — Електронний підручник, що містить огляд технологій і конструктивних схем просторових двошарових ґраток (space frames), приклади розрахунків та конструктивних вузлів
31. Кагановський Л.О. Нові рішення вузлових з'єднань стрижнів структурних та одношарових решітчастих конструкцій / Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. –Випуск 5, 2010 р.192 с.
32. Roof Truss Guide : design and construction of standard timber and steel trusses : practical guide / GTZ. — Без місця вид., без видавця, без дати. — Практичні рекомендації та розрахункові приклади для ферм і стержневих покриттів

## **ДОДАТКИ**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МАТЕРІАЛИ  
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВОЇ  
КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ  
ТА АСПІРАНТІВ, ПРИСВЯЧЕНОЇ  
МІЖНАРОДНОМУ ДНЮ СТУДЕНТА**

**(17-21 листопада 2025 р., м. Суми)**

Рекомендовано до друку науково-координаційною радою Сумського національного аграрного університету (протокол № 4 від 19.11.2025 р.)

**Редакційна рада:**

Коваленко І.М., д.б.н., професор  
Данько Ю.І., д.е.н., професор  
Ярощук Р.А., к.с.-г.н., доцент

**Редакційна колегія:**

Геєнко М.М., к.е.н., професор  
Думанчук М.Ю., к.т.н., доцент  
Кисельов О.Б., к.с.-г.н., доцент  
Масик І.М., к.с.-г.н., доцент  
Михайліченко М.А., к.і.н., доцент  
Синенко Т.П., PhD, доцент  
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент  
Шкромада О.І., д.вет.н., професор

**Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента – (17-21 листопада 2025 р.). – Суми, 2025. – 611 с.**

У збірку увійшли тези доповідей Всеукраїнської наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента.  
Для викладачів, студентів, аспірантів.

## СТЕРЖНЬОВІ СТРУКТУРНІ ПЛИТИ-ЕФЕКТИВНІ СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ ПОКРИТТЯ

Слухаєвський Б.Г., здобувач СВО Магістр ОПП "Будівництво та цивільна інженерія"  
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент  
Сумський НАУ

Сучасні тенденції будівництва вимагають пошуку конструктивних рішень, що забезпечують високу надійність, економічність та скорочення матеріалоемності. Одним із перспективних напрямів є застосування **стержньових структурних плит**, які поєднують у собі просторову жорсткість та легкість конструкції.

Стержньові плити утворюються за рахунок просторової роботи системи стержнів, що формують трикутні чи багатокутні комірки. Така структура забезпечує **рівномірний розподіл навантаження**, підвищену жорсткість та стійкість до локальних деформацій.

Основні переваги стержньових плит:

- зменшення матеріалоемності у порівнянні з традиційними плитами;
- можливість переkritтя великих прольотів без проміжних опор;
- висока технологічність виготовлення та монтажу;
- гнучкість у формуванні архітектурних рішень;
- ефективність при роботі в умовах значних експлуатаційних навантажень.

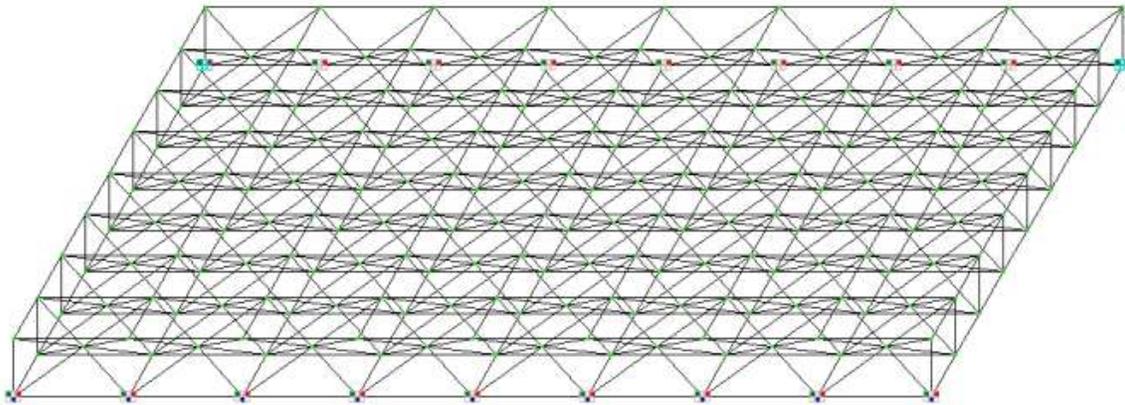


Рис. 1 Скінченоелементна модель просторової плити покриття [1]

Дослідження показують, що застосування стержньових плит у покриттях промислових та громадських будівель дозволяє **знижити витрати сталі до 20–25 %** у порівнянні з класичними балковими системами. Крім того, вони сприяють створенню легких та енергоефективних конструкцій, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку будівництва.

Таким чином, стержньові структурні плити можна розглядати як **оптимальне конструктивне рішення для сучасних покриттів**, яке поєднує економічність, надійність та архітектурну виразність.

### Література

1. Срібняк Н.; Циганенко Л.; Циганенко Г.; Галушка С. Stress-strain state of space grid structure. // *Industrial Machine Building & Civil Engineering*. – 2020. – №55. – Article 2339. – DOI: 10.26906/znp.2020.55.2339.
2. Pérez-Valcárcel J.; Muñoz-Vidal M.; López César I.; Suárez Riestra F.; Freire Tellado M. Deployable space grids with lockable joints. // *International Journal of Space Structures*. – 2021. – Vol. 36, Issue 2 (June).
3. Luo Y.; Xue Y. Recent development and engineering practices of space grid structures in China. // *International Journal of Space Structures*. – 2024.

## СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОЕКТУВАННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СТЕРЖНЬОВИХ ПЛИТ

Слухаєвський Б.Г., здобувач СВО Магістр ОПП "Будівництво та цивільна інженерія"  
Срібняк Н.М., к.т.н., доцент  
Сумський НАУ

Сучасне будівництво базується на тенденціях щодо підвищення енергоефективності, зниження матеріалоемності та прискорення монтажу. У цьому контексті стержньові структурні плити (просторові ґрати на основі стержнів) стають перспективним рішенням для покриттів з великими прольотами.

### Інноваційна конструктивна форма

Стержньові плити — це тривимірна решітка із вузлами та стержнями, що створює просторово-стійку та легку конструкцію. Вона ефективно розподіляє навантаження і дозволяє перекривати значні площі з мінімальною залізною масою, як видно на зображеннях.

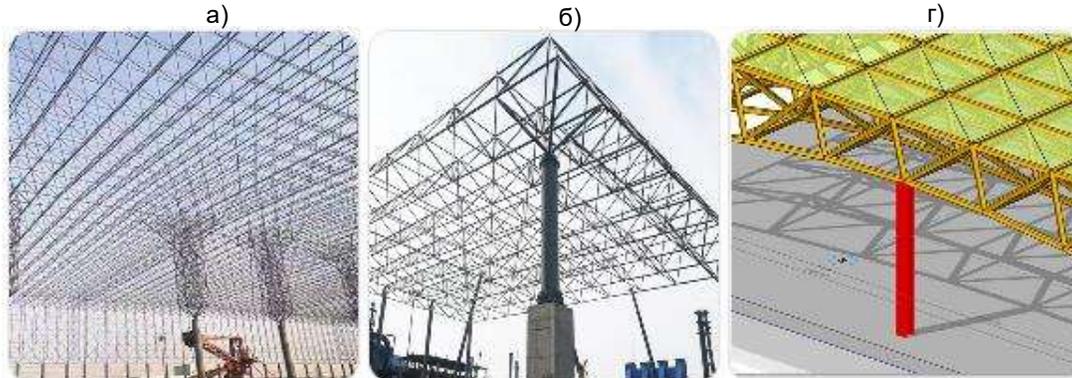


Рис. 1. Сталеві просторові ґраткові конструкції, типові для ангарів чи великих промислових покриттів - а , б; 3D-модель просторової ферми із тонких стрижнів, виконана в Revit - в

### Переваги конструкції

- Матеріальна ефективність — до 20–25% менше сталі порівняно із традиційними фермами.
- Просторова жорсткість, що забезпечує високий захист від деформацій.
- Модульність та швидкий монтаж — уніфіковані елементи легко збираються на будмайданчику.
- Архітектурна гнучкість — стояться у різних модулях і формах, відповідно до дизайнерських вимог.

### Сучасні підходи та методи

- Комп'ютерне моделювання в CAD/BIM-середовищі (наприклад, Revit) дозволяє оптимізувати стрижневі мережі залежно від навантаження та виду покриття.
- Інтеграція з енерго- та кошторисними системами – забезпечує автоматичне формування специфікацій і економії.

### Застосування

- Широкі прольоти у промислових складах, спортивних аренах, виставкових майданчиках.
- Гнучкість у дизайні, можливість криволінійних форм та різноманітних поверхонь.

Отже, стержньові структурні плити — це сучасне й ефективне конструктивне рішення для покриттів: це база для легких, економічних і архітектурно гнучких споруд, що відповідають вимогам сучасних інженерно-будівельних стандартів.

### Література

- 1.Бабич Є. М., Гнесь І. Й., Горбач В. І. Будівельні конструкції : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. 624 с.
- 2.Винарчик А. В., Рахімова О. Г. Просторові стрижневі конструкції: ефективність та сфери застосування // Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2020. № 3. С. 45–52.
3. Makowski Z. S. Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. London : Applied Science Publishers, 1981. 322 p.
- 4.Zhang Y., Ohsaki M. Optimization and stability of space truss structures under dynamic loads // Engineering Structures. 2017. Vol. 138. P. 285–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.011>

Коштур О.В., Бородай Д.С. ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ СУЧАСНИХ РЕКРЕАЦІЙНО-РОЗВАЖАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ НА ОСНОВІ АДАПТАЦІЇ БУДІВЕЛЬ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ .....	206
Кресан А.О., Бородай А.С. НОВІ АРХІТЕКТУРНІ ФОРМИ ЯК РІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПЕРЕНАСЕЛЕННЯ: ВЕРТИКАЛЬНІ МІСТА, БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ТА ПРОСТОРОВІ ТРАНСФОРМАЦІЇ .....	207
Кресан А.О., Бородай Я.О. РОЗВИТОК МОДУЛЬНОЇ ТА АДАПТИВНОЇ АРХІТЕКТУРИ ЯК ВІДПОВІДЬ НА СУЧАСНІ ВИКЛИКИ УРБАНІЗАЦІЇ ТА ЗМІНЮВАНІ ПОТРЕБИ СУСПІЛЬСТВА .....	208
Кулик А., Волков Д.Г. ЗАХИСНІ КІМНАТИ-УКРИТТЯ В КВАРТИРАХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ .....	209
Кулик А.М., Драник О.І. ОСОБЛИВОСТІ ДОГЛЯДУ ТА ОБСТЕЖЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ .....	210
Кунда К.А., Бородай С.П. АРХІТЕКТУРА ЯК ВАЖЛИВА СФЕРА ЛЮДСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ .....	211
Лебідь М.В., Тараненко С.В. МІСТОБУДІВНЕ РІШЕННЯ ТА ГЕНЕРАЛЬНИЙ ПЛАН БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ .....	212
Левшенко С.О. АНАЛІЗ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОВНІШНЬОЇ СТІНИ БУДИНКУ .....	213
Левшенко С.О. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОВНІШНЬОЇ СТІНИ .....	214
Литвиненко В.К., Сіробаба В.О. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОБІГРІВУ НА МОСТОВІЙ СПОРУДІ .....	215
Лісиченко С.А., Луцьковський В.М. АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОКРИТТЯ З СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ У МАЛОПОВЕРХОВИХ БУДИНКАХ .....	216
Ліщинський О.В., Редько А.О. ВІДПОВІДНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСООБМІНУ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД В КИПЛЯЧОМУ ШАРІ З ЗАНУРЕНИМИ ТЕПЛООБМІННИМИ ПОВЕРХНЯМИ ЦІЛЯМ СТАЛОГО РОЗВИТКУ .....	217
Логвиненко А.В., Циганенко Л.А. ФОТОКАТАЛІТИЧНІ НАНОПОКРИТТЯ. АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ .....	218
Лозко В.Г., Роговий С.І. РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ФЕРМ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА .....	219
Лозко В.Г., Роговий С.І. РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ПРИКЛАДІ КРОКВ'ЯНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ .....	220
Локтіонов А.О. ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ БПЛА У ВІМ-ТЕХНОЛОГІЇ ДОРОЖНЬОГО БУДІВНИЦТВА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ІНФРАСТРУКТУРОЮ .....	221
Маківський Д.О. ЗНАЧЕННЯ ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧНИХ І КАРТОГРАФІЧНИХ РОБІТ ПРИ БУДІВНИЦТВІ .....	222
Максименко В.О. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ДОРОЖНЬОЇ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБИРАННЯ ПШЕНИЦІ .....	223
Максименко В.О. ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗБИРАННЯ ПШЕНИЦІ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ .....	224
Масалітов С.Ю. ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ У БЕТОННИХ СУМІШАХ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO <sub>2</sub> .....	225
Мосьпан Т.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФАХВЕРКУ: КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ, СУЧАСНЕ ВИКОРИСТАННЯ, ПЕРЕВАГИ ФАХВЕРКОВИХ БУДИНКІВ .....	226
Мосьпан Т.О., Бородай Я.О. ДОСЛІДЖЕННЯ НА ТЕМУ ДРУКУВАННЯ БУДІВЕЛЬ 3D-ПРИНТЕРОМ В УКРАЇНІ: ОГЛЯД СТАНУ НАРАЗІ, ПЕРЕВАГИ ТА МОЖЛИВОСТІ, ВИКЛИКИ ТА РИЗИКИ .....	227
Онишкевич С.О., Драник О.І. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНИХ МАШИНАХ .....	228
Осташко Я.О., Коцура І.І. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ШНЕКОВИМ ТРАНСПОРТЕРОМ .....	229
Осташко Я.О., Коцура І.І. ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАНТІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ .....	230
Петренко М.С., Бородай С.П. ВОСКРЕСЕНСЬКА ЦЕРКВА В СУМАХ – ПАМ'ЯТКА АРХІТЕКТУРИ УКРАЇНСЬКОГО БАРОКО .....	231
Романенко О., Бородай Д.С. ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ СУЧАСНИХ ПРИНЦИПІВ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ІСТОРИЧНОЇ ЗАБУДОВИ В УКРАЇНІ .....	232
Рубан О.М., Бородай Я.О. ЕКОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД У ПРОЄКТУВАННІ ТУРИСТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ .....	233
Скрипка Є.О. ВИКОРИСТАННЯ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ .....	234
Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. СТЕРЖНЬОВІ СТРУКТУРНІ ПЛИТИ — ЕФЕКТИВНІ СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ ПОКРИТТЯ .....	235
Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СТЕРЖНЬОВИХ ПЛИТ .....	236
Срібняк Н.М. ВИКОРИСТАННЯ СТАЛИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ .....	237
Срібняк Н.М. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ У БУДІВНИЦТВІ .....	238
Срібняк Н.М. ВИСОКОЕФЕКТИВНІ БЕТОНИ З ДОМІШКАМИ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ .....	239



Кафедра будівельних конструкцій

# Робота структурної просторової плити під навантаженням

Студент: Слухаєвський Богдан Григорович

Група БУД 2401-2м , курс 2м

Керівник: к.т.н., доцент Срібняк Н.М.

## Актуальність теми

**Аналіз публікацій та досліджень** встановив, що структурні покриття на основі просторових стержневих плит є універсальними, легкими та ефективними конструктивними системами для великопрольотних будівель. Металеві ґратчасті системи, особливо з трубчастими профілями, поєднують архітектурну виразність із високою несучою здатністю. Ефективність плит залежить від конструктивних параметрів, типу сітки (квадратна, трикутна або змішана) та способу обпирання на опори. Оптимальні схеми спирання забезпечують рівномірний розподіл внутрішніх зусиль, зменшують прогини та підвищують просторову стійкість. Дослідження вузлів показують, що зварні, болтові та комбіновані з'єднання (зокрема система MERO) надійно сприймають осьові зусилля, проте можуть бути вразливі до згинальних напружень. Раціональні схеми обпирання плит і діагональна орієнтація сітки дозволяють знизити зусилля в поясах, зменшити прогин і забезпечити економне використання матеріалів.

# Апробація роботи

- ▶ Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. Стержньові структурні плити-ефективні сучасні конструкції покриття // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.С235
- ▶ Слухаєвський Б.Г., Срібняк Н.М. Сучасні підходи до проектування покриттів із використанням стержньових плит. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.С.236

**Метою** виконання дослідної роботи є проведення числових досліджень щодо виявлення напружено-деформованого стану та підбору нових перерізів для усіх конструктивних груп стержнів скінченоелементних моделей структурної плити, структура яких різниться лише формою базового елемента.

## **Задачі дослідження:**

- Дослідити принципи побудови та роботу основних типів просторових стрижневих плит і проаналізувати ключові чинники, що визначають їхній напружено-деформований стан.
- Виконати числовим способом статичний аналіз та конструктивний розрахунок варіантів просторової стержньової плит в ПК Ліра-САПР.
- Провести комплексний аналіз роботи розрахункових моделей, визначивши розподіл внутрішніх зусиль, характер деформацій, переміщення вузлів, рівень загальної просторової стійкості, а також фактичний ступінь використання жорсткісних характеристик призначених перерізів стержнів.
- Здійснити оптимізаційний підбір перерізів елементів в модулі «Метал» програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024 відповідно до чинних нормативних вимог [9], з подальшим порівняльним аналізом ваги всіх конструктивних рішень та обґрунтованим вибором варіанту з найменшими витратами сталі.

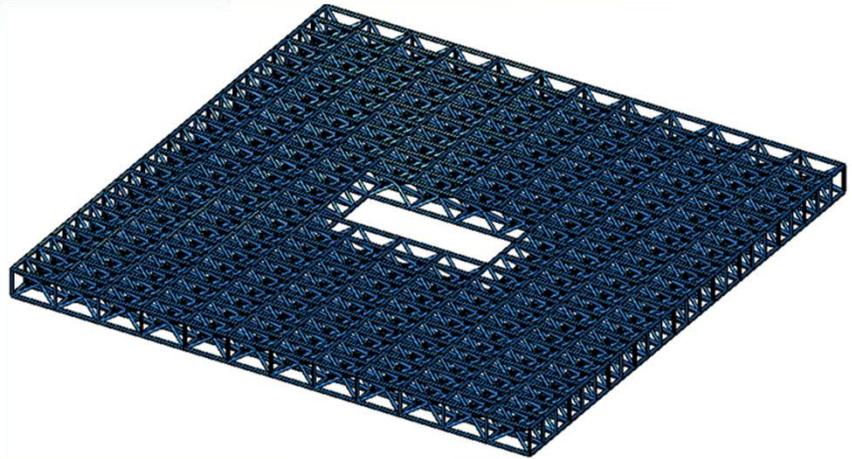
- ▶ **Об'єкт дослідження** – просторові стержньові структурні покриття з габаритами в плані  $36,0 \times 36,0$  м мають ідентичні фізико-механічні характеристики матеріалів та однакову загальну геометрію, відрізняючись між собою виключно конфігурацією базового модуля — кристалічного елемента.
- ▶ **Предмет дослідження** – напружено-деформований стан скінченоелементних моделей просторових стержньових плит, їх конструктивне вирішення, матеріалоємність трьох моделей стержньових просторових плит.
- ▶ **Практичне значення отриманих результатів**

Отримані результати є результатами оптимізаційного розрахунку за одним лише критерієм, який суттєво може впливати на матеріалоємність конструкції.

# Методи дослідження

- Використано **комплекс теоретичних, числових, нормативних та аналітичних методів** для всебічної оцінки просторових стержневих плит.
- Основний інструмент – **метод скінченних елементів (МСЕ)** у ЛІРА-САПР 2024 для моделювання напружено-деформованого стану.
- **Числовий і лінійний статичний аналіз** застосовано для визначення внутрішніх зусиль, переміщень вузлів, деформацій та стійкості.
- Ефективність конструктивних схем оцінювалася **методом порівняльного аналізу** між трьома моделями плит.
- Підбір і перевірка перерізів стержнів виконані за **нормативним методом у модулі «Метал» ЛІРА-САПР**.
- **Оптимізаційний підбір перерізів** проводився для мінімізації ваги конструкції при дотриманні всіх нормативних вимог.
- **Аналітичний та графічний методи** використані для узагальнення результатів, систематизації даних і наочного подання внутрішніх зусиль, деформацій та переміщень.

Просторова модель структурної плити 36x36 м, що виконує роль перфорованого світлового атріуму, в центрі якого передбачено відкритий отвір



Отже, у просторових стержньових плитах із «кристалічною» геометрією центральний отвір сприймається не як конструктивний недолік, а як ключова архітектурна домінанта. Він формує композиційний центр, створює виразну світлову драматургію, візуально полегшує масу покриття та підсилює логіку кристалічної структури. Завдяки цьому конструкція переходить у площину архітектурного образу, поєднуючи інженерну раціональність і художню виразність.

Структурна плита розмірами 36×36 м у плані виконує роль перфорованого світлового атріуму, в центрі якого передбачено відкритий отвір.

Природне світло проникає всередину, каскадно проходячи крізь просторову ґратчасту структуру

# Форма базового структуроутворюючого елемента

- Моделі, що будуть досліджуватися числовим методом, формуються методом мультиплікації по двом осям  $X$  та  $Y$  горизонтальної площини  $XOY$  тривимірної системи координат

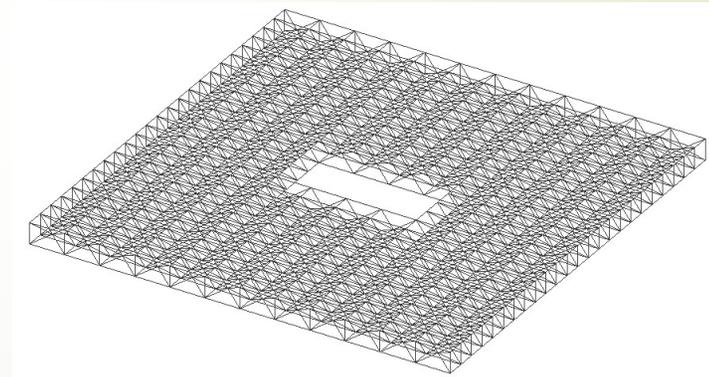
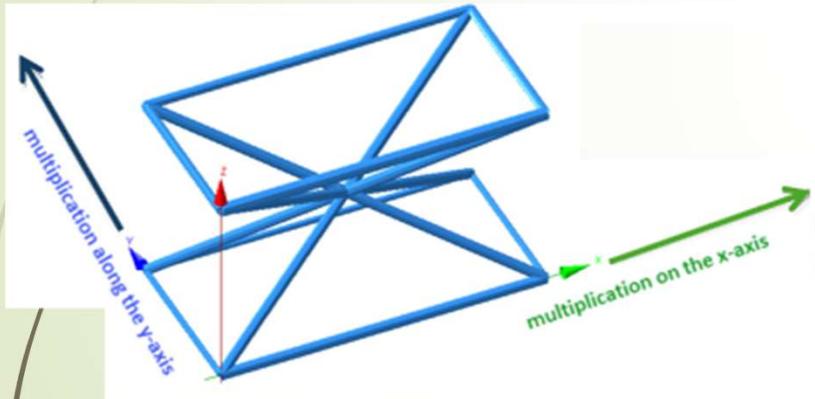


Рис. Базовий кристал (формуєтворюючий елемент) для схеми №1-а; структура просторової сітки, утворена множенням базового елемента вздовж осей  $X$  і  $Y$  -б для схеми №1

- Форма базового формоутворюючого елемента стрижневої просторової плити є визначальним чинником для її напружено-деформованого стану, оскільки саме геометрична схема задає траєкторії силових потоків, формує системи розтягнутих і стислих стрижнів, визначає жорсткісні характеристики та стійкість конструкції. Три показані на рис. варіанти мають суттєві відмінності у просторовій роботі та механічній ефективності.

## Базові елементи (просторові кристали), що прийняти для моделювання плити

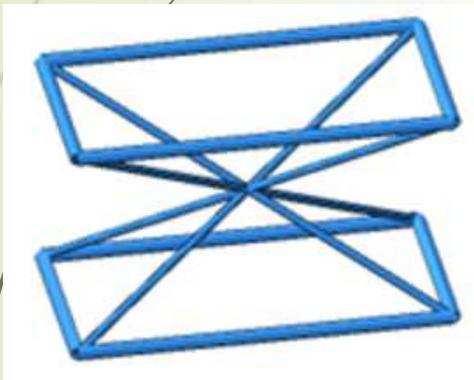


Схема №1

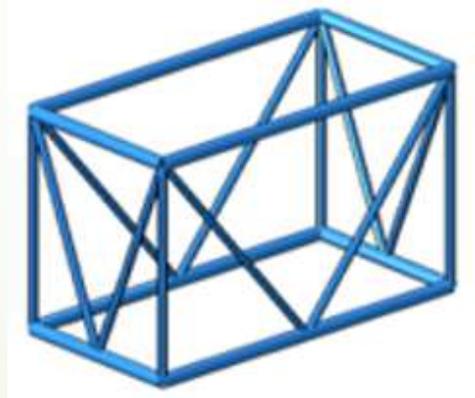


Схема №2

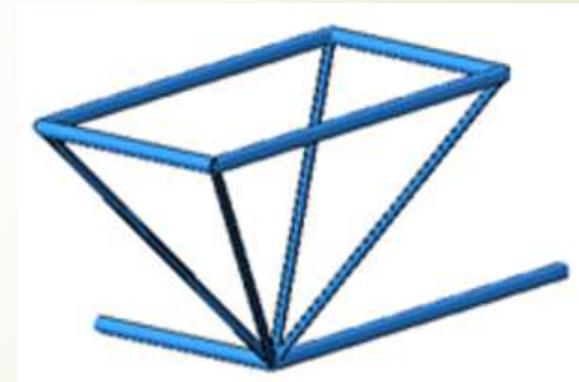


Схема №3

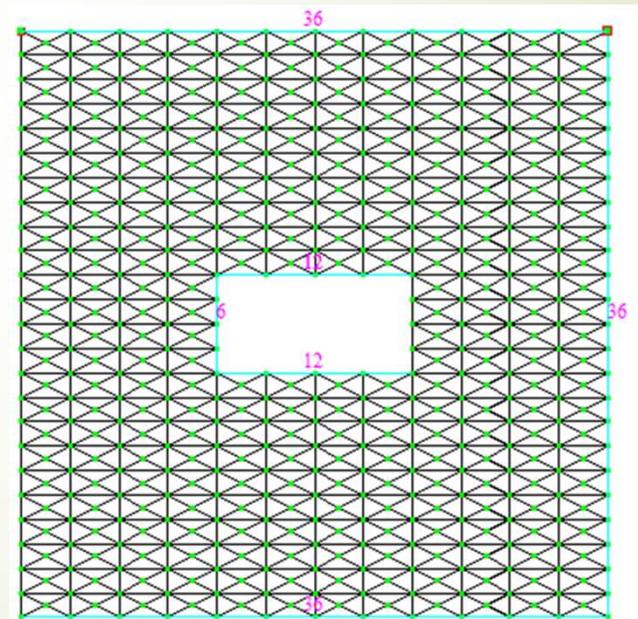
## Таблиця Вплив форми елемента на напружено-деформований стан ПЛИТИ

Характеристика	Х-подібний елемент 	Об'ємно-просторовий модуль 	Конусоподібний елемент 
Просторова жорсткість	Висока	Дуже висока	Середня
Рівномірність розподілу напружень	Добра	Відмінна	Нерівномірна
Стійкість до крутіння	Достатня	Висока	Низька-середня
Сприйняття вертикальних навантажень	Високе	Високе	Дуже високе (уздовж осі)
Сприйняття горизонтальних навантажень	Добре	Відмінно	Посередньо
Чутливість до локальних деформацій	Помірна	Низька	Підвищена
Вимоги до вузлів	Стандартні	Помірно підвищені	Високі (особливо до основного вузла)
Загальна конструктивна ефективність	Висока	Найвища	Середня

# Скінченоелементні моделі просторової плити, що досліджується

- ▶ Габарити, схема дії навантажень і тип кристала залишаються однаковими для всіх моделей
- ▶ Квадратна в плані решітчаста плита працює в обох напрямках і належить до найефективніших просторових систем
- ▶ Стержньова структурна просторова плита має квадратну в плані форму з розмірами сторін 36x36 м. Така конструкція здатна перекрити значний проліт без улаштування додаткових опор

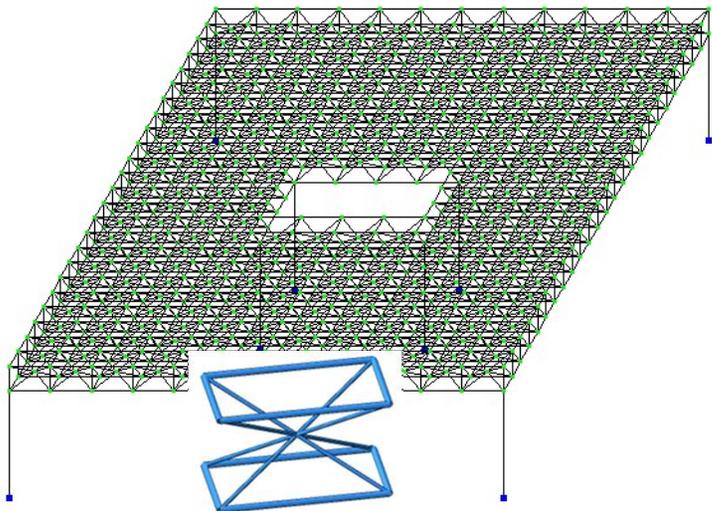
Рис. Вид плити 36x36 м зверху (на прикладі схеми №1) в площині XOY



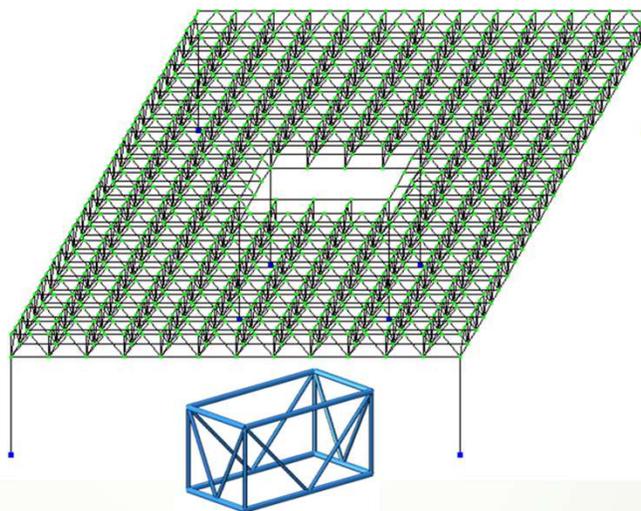


# СЕ моделі, що підлягають дослідженню

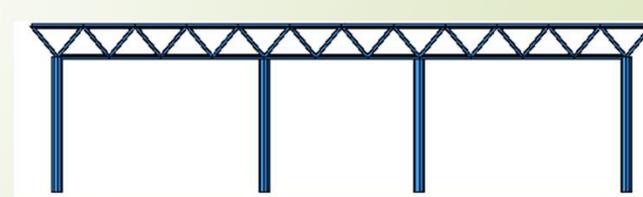
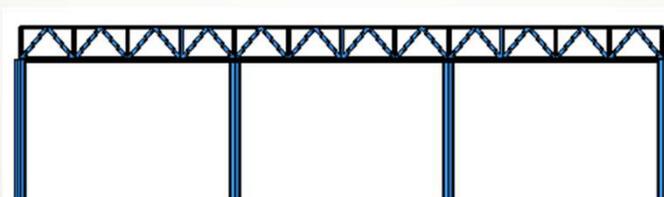
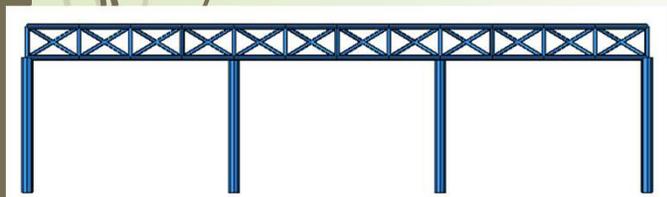
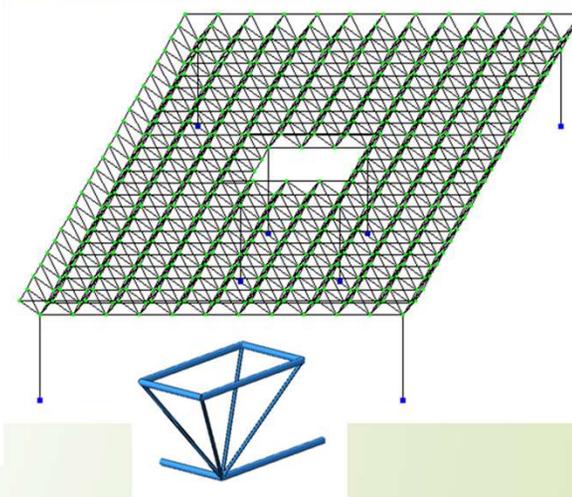
## Схема №1



## Схема №2



## Схема №3



Таблиця **Жорсткісні параметри компонентів структурної плити**

Назва елемента	Поперечний переріз, см	$E, \text{т/м}^2$	$R, \text{т/м}^3$	$\mu$	$A, \text{см}^2$	$q, \text{т/м}$
1. Стержні верхнього поясу	Труба 273x15	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	121,58	0,095
2. Стержні нижнього поясу	Труба 273x15	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	121,58	0,095
3. Розкоси структурної плити	Труба 219x30	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	178,13	0,140
4. Колони	Труба 630x9	$2,06 \cdot 10^7$	7,85	0,3	175,58	0,138

Всі елементи просторової плити прийняті із сталі конструкційної, вуглецевої для будівельних конструкцій.

Як **матеріали** для конструювання прийнято профілі трубчатого перерізу із сталі класу С235 за [9] з характеристиками міцності:  $R_y=230 \text{ Па}=24,0 \text{ кН/см}^2$ ,  $R_{yn}=235 \text{ Па}=23,5 \text{ кН/см}^2$ ;  $E= 2,06 \cdot 10^8 \text{ кН/см}^2$ ,  $\gamma=77,0085 \text{ кН/м}^3$ ,  $\mu=0,3$

Елементи плити моделювалися як стрижні загального вигляду з шістьма ступенями свободи. Колони змодельовано теж скінченим елементом №10, що має шість ступенів свободи у кожному вузлі. Усі вузли конструкції прийнято шарнірними

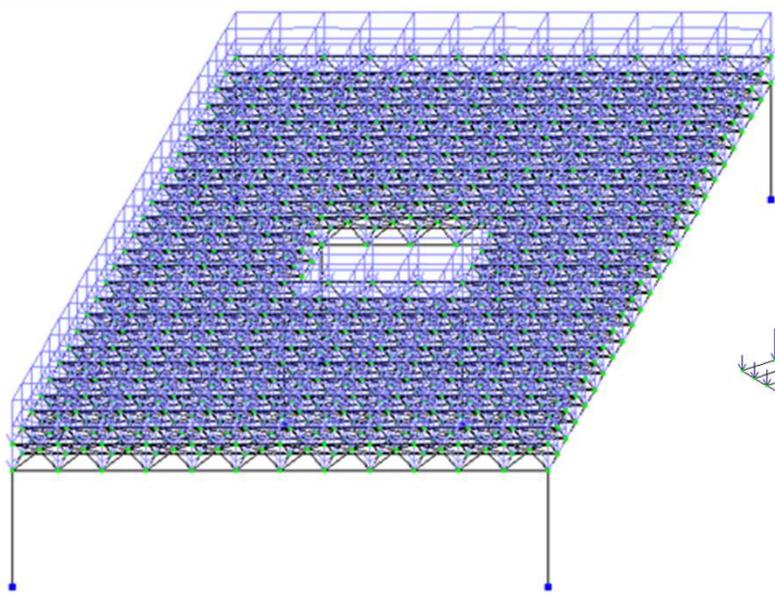


Таблиця Збір навантаження на 1 м<sup>2</sup>  
просторової плити

№ з/п	Назва конструктиву	Нормативне значення, кг/м <sup>2</sup>	Коефіцієнт надійності $\gamma_f$	Розрахункове значення, кг/м <sup>2</sup>
<b>1. Постійні навантаження</b>				
1	Наплавлюваний єврорубероїд «Акваізол»	10	1,2	12
2	Утеплювач – мінераловатні плити підвищеної жорсткості на синтетичному в'язучому	10	1,3	13
3	Пароізоляція – 1 шар руберойду	5	1,2	6
4	Профнастил	15	1,1	16,5
5	Прогони покриття із гнutoго профілю [18 (14,96 кгс/м.п)]	1,29	1,1	1,42
6	Власна вага структури	Задається автоматично в ПК ЛІРА-САПР		
<b>ВСЬОГО ПОСТІЙНЕ</b>		116,1		133,42
<b>1. Тимчасові навантаження</b>				
7.	Снігове (за [16])	167	1,14	190,38
<b>Всього тимчасове:</b>		167		190,38
<b>РАЗОМ (постійне та тимчасове)</b>		<b>244,18</b>		<b>328,8</b>

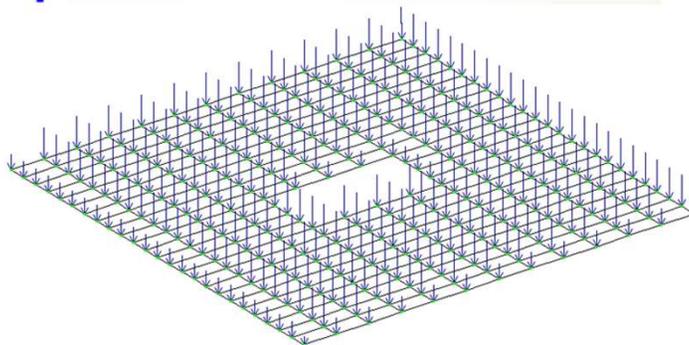
➤ Завантаження №1

**Власна вага конструкції**



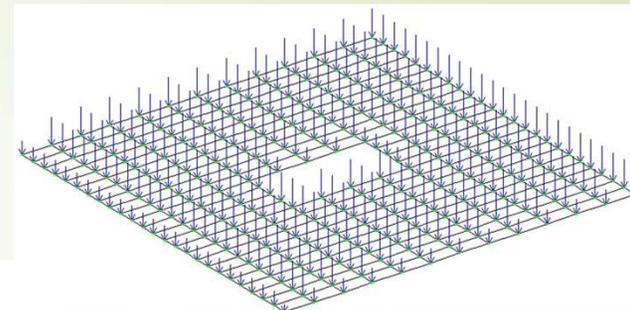
➤ Завантаження №2

**Вага покрівлі**



➤ Завантаження №3

**Сніг**

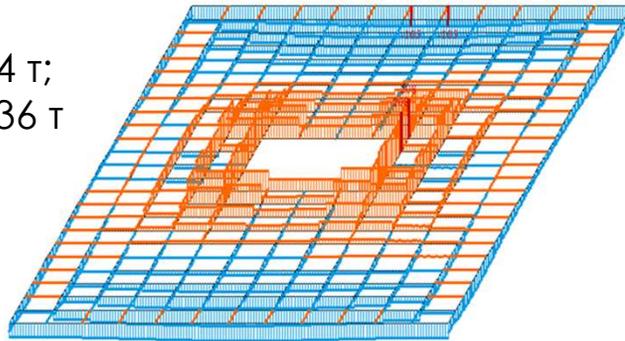


# РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

## Епюри осьових зусиль N від РСН2 для верхнього поясу структури

схема №1

$N_{max} = -105,34 \text{ т};$   
 $N_{max} = +208,36 \text{ т}$

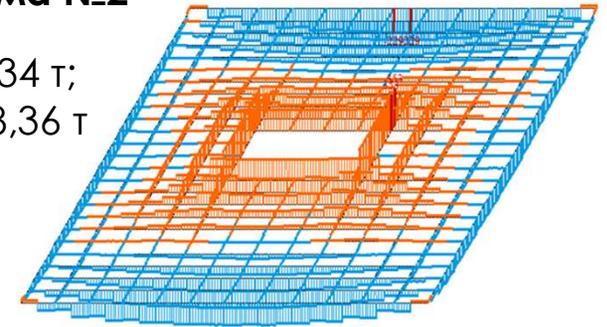


2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра N  
Единиця вимірювання - т

Отм. = 1.800  
Минимальное значение -105.344; Максимальное значение 208.357

схема №2

$N_{max} = -105,34 \text{ т};$   
 $N_{max} = +208,36 \text{ т}$

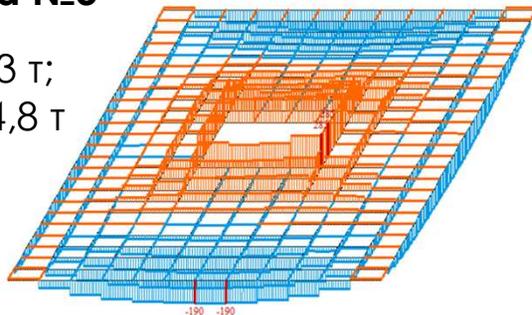


2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра N  
Единиця вимірювання - т

Отм. = 1.800  
Минимальное значение -229.139; Максимальное значение 353.21

схема №3

$N_{max} = -190,3 \text{ т};$   
 $N_{max} = +284,8 \text{ т}$



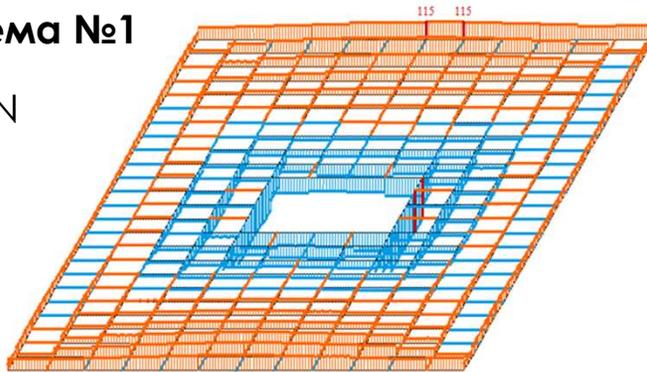
2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Епюра N  
Единиця вимірювання - т

Отм. = 1.800  
Минимальное значение -190.302; Максимальное значение 284.77

# Епюри осьових зусиль N від РСН2 для **НИЖЬОГО** поясу структури

**схема №1**

$N_{max} = -268,9 \text{ т}$ ;  
 $N_{max} = +114,9 \text{ т}$



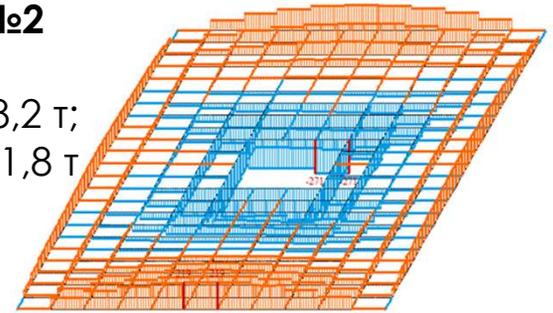
2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра N  
Единицы измерения - т

zy  
x

Отм. 0.000  
Минимальное значение -268.873; Максимальное значение 114.933

**схема №2**

$N_{max} = -338,2 \text{ т}$ ;  
 $N_{max} = +211,8 \text{ т}$



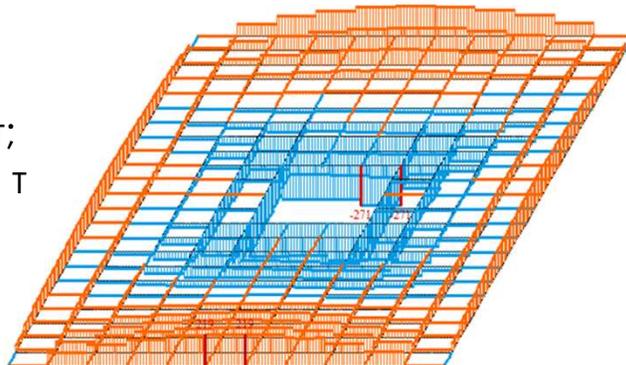
2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра N  
Единицы измерения - т

zy  
x

Отм. 0.000  
Минимальное значение -270.628; Максимальное значение 219.251

**схема №3**

$N_{max} = -270,6 \text{ т}$ ;  
 $N_{max} = +219,3 \text{ т}$



2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра N  
Единицы измерения - т

zy  
x

Отм. 0.000  
Минимальное значение -270.628; Максимальное значение 219.251

# Мозаїка осьових зусиль N від РСН2 для решітки структури

схема №1

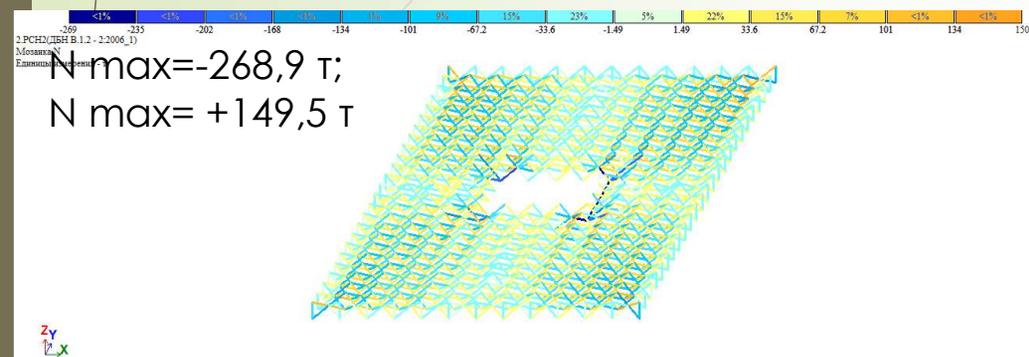


схема №2

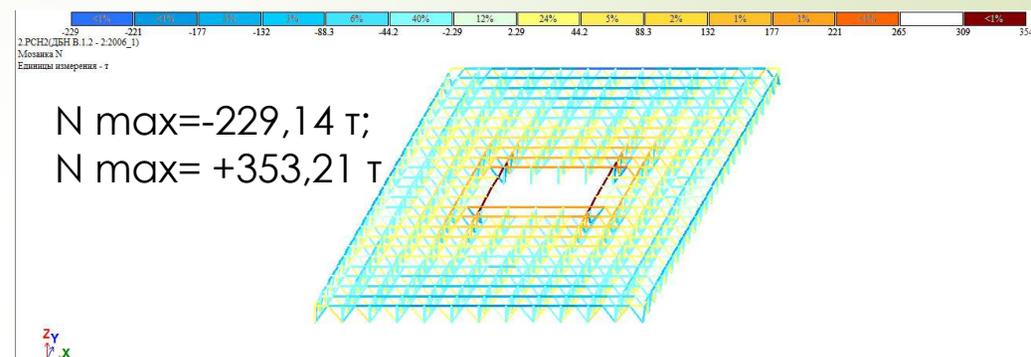
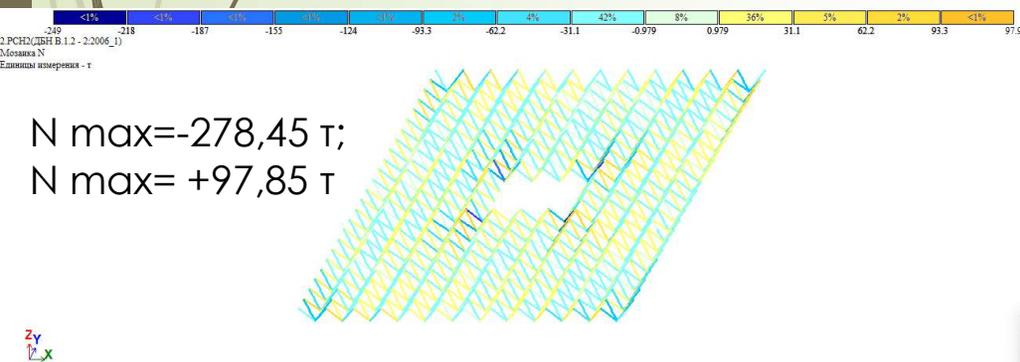


схема №3

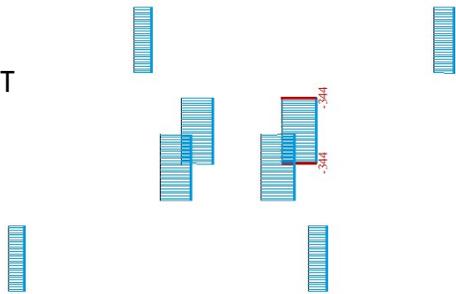


# Епюри зусиль в **КОЛОНАХ** системи на прикладі Схеми №1 від РСН2

2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра N  
Единицы измерения - т

## схема №1

$N_{max} = -343,6 \text{ т}$

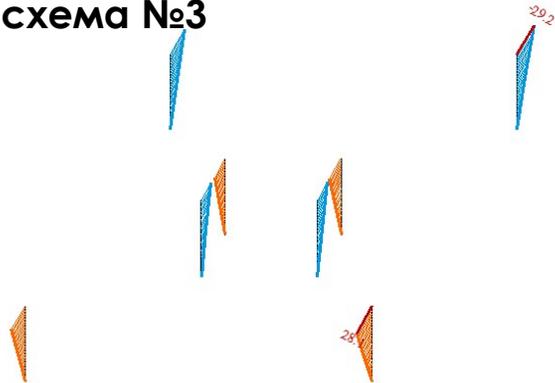


Минимальное значение -343,639;

2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра Mz  
Единицы измерения - т\*м

## схема №3

$M_z, \min = -29,3 \text{ т*м};$   
 $M_z, \max = 28,06 \text{ т*м}$

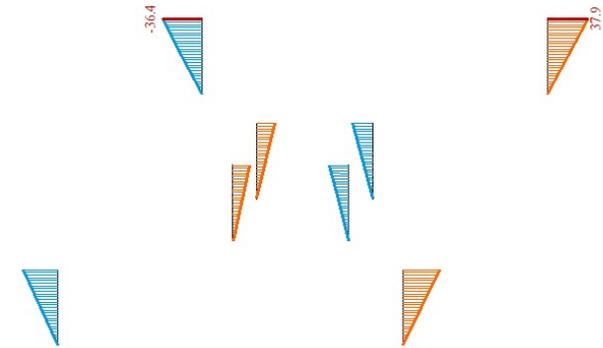


2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра Mu  
Единицы измерения - т\*м

2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра Mu  
Единицы измерения - т\*м

## схема №2

$M_{y, \min} = -36,4 \text{ т*м};$   
 $M_{y, \max} = 37,85 \text{ т*м}$

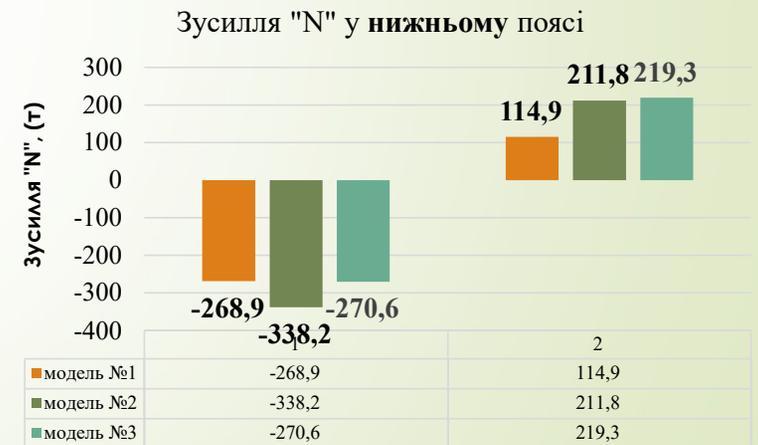


2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Эпюра Mu  
Единицы измерения - т\*м

Минимальное значение -36,3557; Максимальное значение 37,8535

## Максимальні зусилля N в конструктивних групах стержнів просторової плити

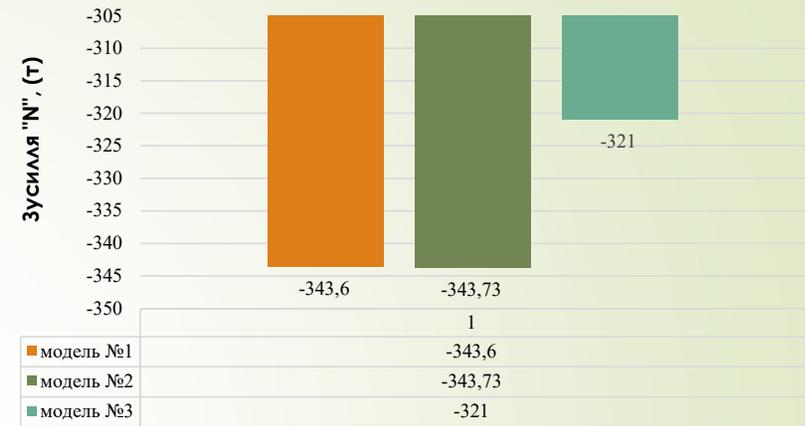
№ схем и	Верхній пояс		Нижній пояс		Решітка	
	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг	Стиск	Розтяг
1	-105,3	208,36	-268,9	114,9	-268,9	149,5
2	-229,1	353,21	-338,2	211,8	-229,1	353,2
3	-190,3	284,8	-270,6	219,3	-278,5	97,85



Таблиця Максимальні зусилля N в колонах моделей

№ схем и	N, [т]	My, [т м]		Mz, [т м]	
1	-343,6	-36,4	37,85	-29,3	28,06
2	-343,7	-44,2	50,73	-42,74	37,26
3	-321	-45,3	48,56	-44,93	45,63

Зусилля "N" в колонах



Момент згину "Mz" в колонах

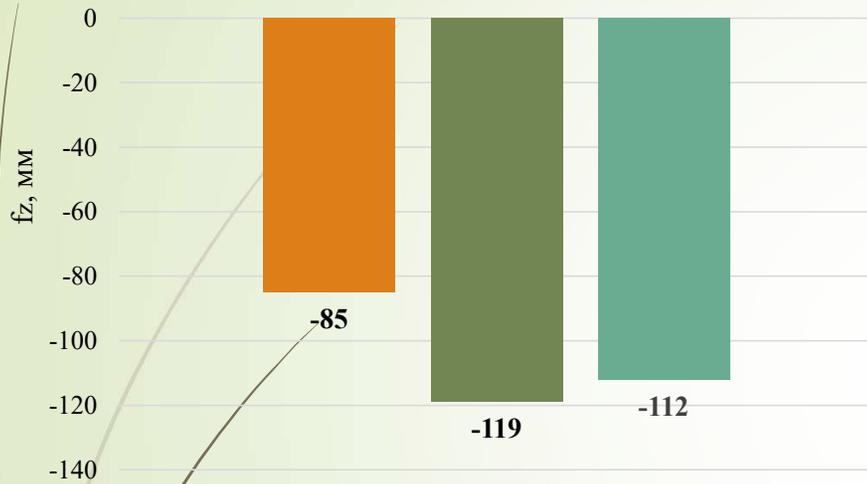


Момент згину "My" в колонах

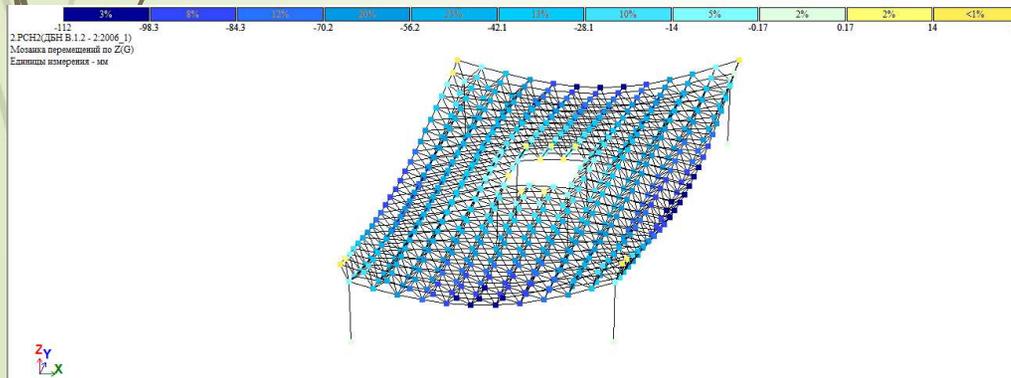


# Деформативність у моделях плит

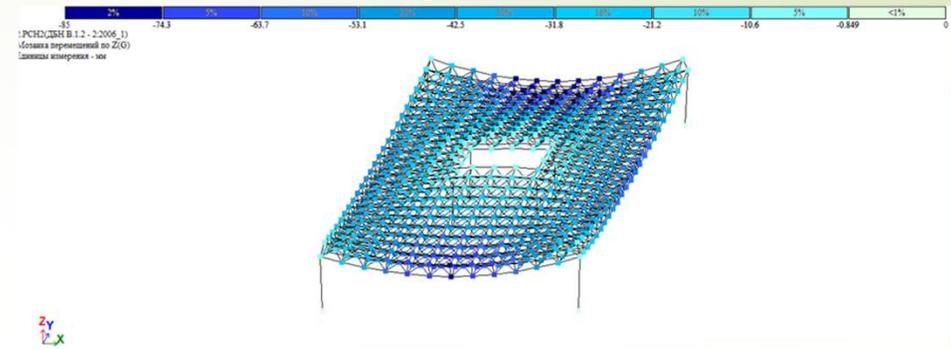
Переміщення  $f_z$ , max (мм)



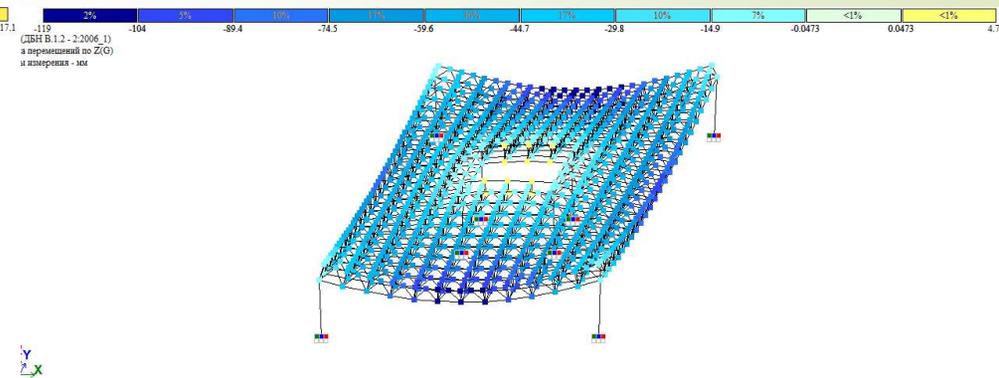
Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №3 від РСН2



Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №1 від РСН2



Мозаїка переміщень вузлів по осі Z та деформована схема для схеми №2 від РСН2



Для усіх трьох моделей значення гранично допустимого прогину за нормами [10] буде однаковим та становитиме:

$$f = \frac{L}{250} = \frac{36000}{250} = 144 \text{ мм}$$

Максимальні прогини моделей структурної плити знаходяться в допустимих межах, тобто не перевищують допустимого значення прогину **в 144 мм**

Схема №1 має найменше переміщення (–85 мм) і є найжорсткішою. Схема №2 найбільше деформується (–119 мм), схема №3 має середні значення (–112 мм). Відповідно, схема №2 деформується на 40% більше, а №3 — на 32% більше за №1. Загалом схеми по-різному реагують на навантаження, але умова жорсткості виконується, тож можна переходити до аналізу НДС.

## Стійкість моделей

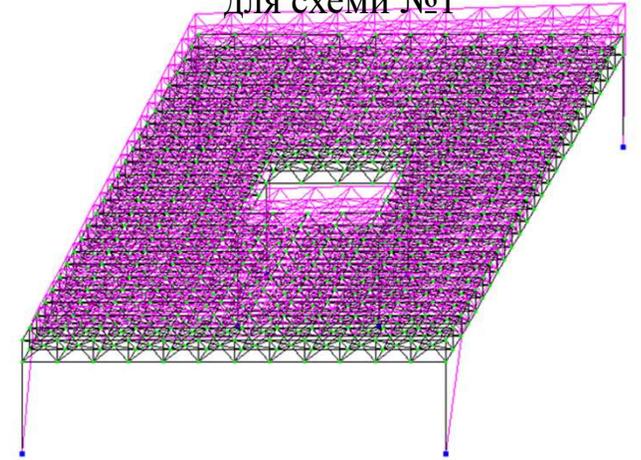


# СТІЙКІСТЬ МОДЕЛЕЙ



Форма втрати стійності від РСН2

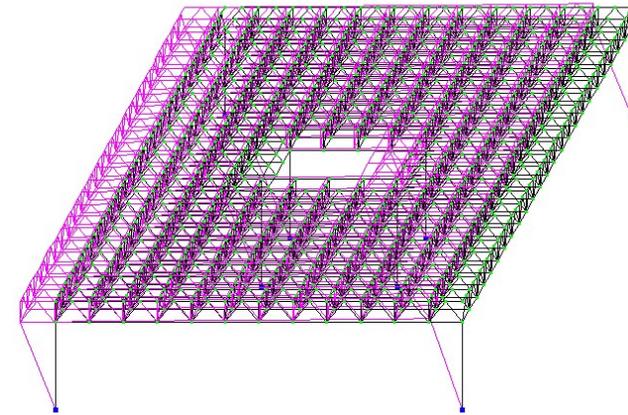
для схеми №1



2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма потери устойчивости в гл. с. 1  
Коэффициент 2.01232



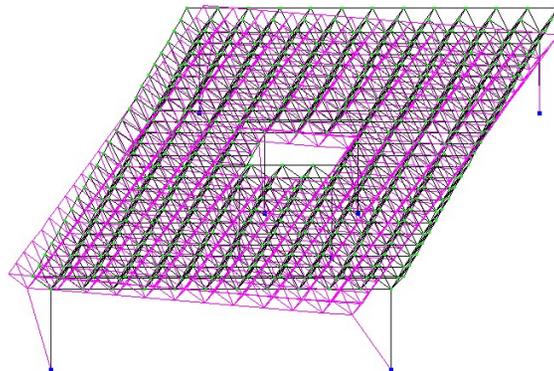
Форма втрати стійності від РСН2 для схеми №2м



2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма потери устойчивости в гл. с. 1  
Коэффициент 2.07821



Форма втрати стійності від РСН2 для схеми №3



2 РСН2(ДБН В.1.2 - 2:2006\_1)  
Форма потери устойчивости в гл. с. 1  
Коэффициент 2.14443



## Висновки по стійкості систем

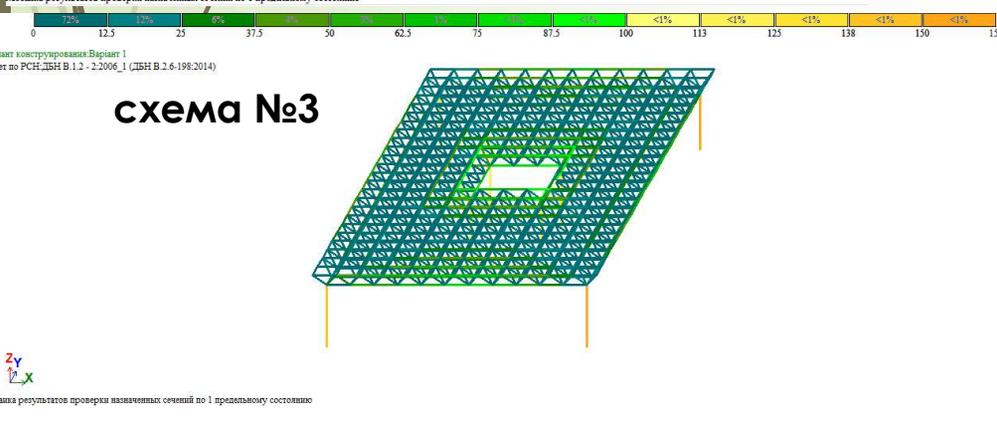
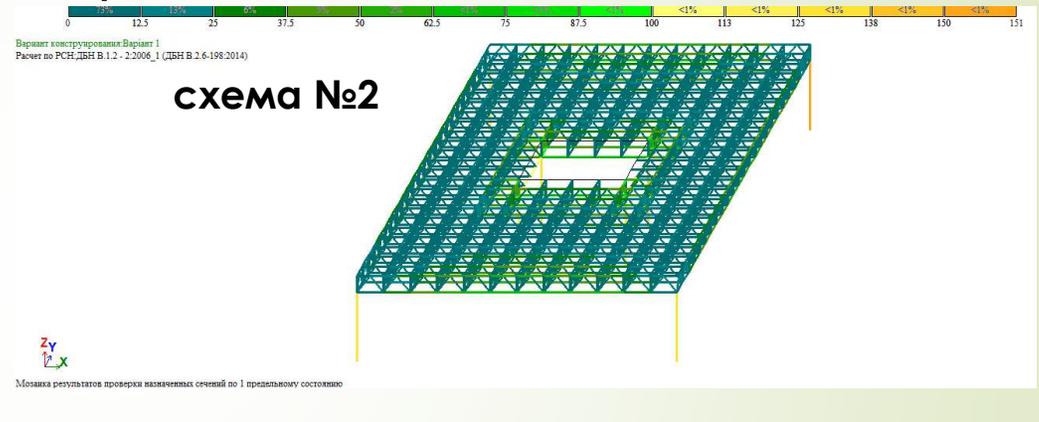
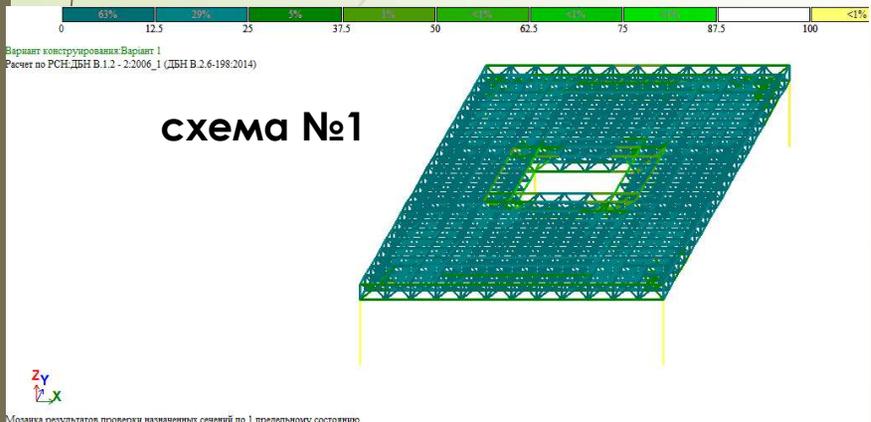
- Коефіцієнт стійкості 2,0-2,14 для стержньової просторової плити означає, що конструкція здатна витримати навантаження, удвічі більше за те, за якого в розрахунковій моделі настає втрата стійкості. Це свідчить про значний запас міцності: фактичне критичне навантаження у два рази перевищує розрахункове, що забезпечує конструкції резерв для сприйняття додаткових впливів, можливих недосконалостей виготовлення та монтажу, а також нерівномірного розподілу навантажень. За такої величини коефіцієнта плита вважається надійною як щодо локальної, так і щодо загальної втрати стійкості, оскільки її критичний стан настає лише при значно більших зусиллях. Отже, діапазон коефіцієнтів для плит 2,0-2,14 свідчить про високий рівень стійкості усіх конструкцій та безпечні умови їх роботи.

## Аналіз використання несучої здатності перерізів стержнів при початкових жорсткісних характеристиках, що задані у вихідних даних

**Розподіл несучої здатності по перерізах для різних конструктивних груп стержнів конструкції плити за 1ГС при жорсткостях, що прийняти у вихідних даних**

Назва конструктивної групи	Несуча здатність перерізу, %		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	36,5	55,3	62,5
Нижній пояс	47,1	62,5	60,5
Решітка	33,8	19,7	24
Колони	126	163	158

# Мозаїка результатів розрахунку за першою групою граничних станів сталевих елементів з поперечними перерізами, призначеним в вихідних даних, % несучої здатності



## Висновки з аналізу ступеня використання перерізів стержнів з урахуванням **початково заданих жорсткісних характеристик** за першою групою граничних станів

- ▶ **Верхні пояси** плити завантажуються відносно помірно — від 36,5% у схемі №1 до 62,5% у схемі №3, що свідчить про зростання їхнього навантаження зі зміною конфігурації стержнів.
- ▶ **Нижні пояси** працюють інтенсивніше: у схемах вони завантажені на 47–62,5%, а у схемі №3 — трохи менше, що говорить про стабільну участь цих елементів у сприйнятті основних згинальних моментів.
- ▶ **Решітка стержнів** використовується незначно — у межах 20–34%, тому ці елементи мають суттєвий запас міцності й не є визначальними для загальної несучої здатності плити. Найбільше занавантаження спостерігається у колон: у всіх схемах їх використання перевищує 100% (126–163%), що вказує на критичний стан і можливу втрату стійкості. Це підкреслює потребу у посиленні колон або збільшенні їхньої жорсткості.
- ▶ Отже, основне **навантаження припадає на верхні та нижні пояси, решітка працює другорядно, а колони є найбільш проблемними елементами**, що визначає ключові напрями для подальшої оптимізації конструкції.

№ схеми	Переріз (профіль труби), прийнятий при першій ітерації	Переріз, підбраний ПК Ліра-САПР за результатами статичного розрахунку		
		№ типу перерізу в ПК Ліра-САПР	Сталь	Профіль труби
<b>Верхній пояс</b>				
1	ТБ 273x15	112	С 235	ТБ273x9
2	ТБ 273x15	170	С 235	ТБ 245x20
3	ТБ 273x15	148	С 235	ТБ 299x13
<b>Нижній пояс</b>				
1	ТБ 273x15	334	С 235	ТБ 273x6,5
2	ТБ 273x15	525	С 235	ТБ 245x20
3	ТБ 273x15	413	С 235	ТБ 273x9,5
<b>Решітка</b>				
1	ТБ 219x30	657	С 235	ТБ 219x8
2	ТБ 219x30	759	С 235	ТБ 245x7,5
3	ТБ 219x30	617	С 235	ТБ 245x15
<b>Колони</b>				
1	ТБ 630x9	220	С 235	ТБ 720x10
2	ТБ 630x9	390	С 235	ТБ 820x9,5
3	ТБ 630x9	266	С 235	ТБ 820x9,5

**Підбір нових профілів в модулі «Метал» ПК Ліра-САПР**

Таблиця 1 Вага верхнього поясу  
(Труби сталеві електрозварні за ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	<b>ТБ 273x9</b>	0,0586	1314	<b>77,00</b>
2	C235	<b>ТБ 245x20</b>	0,111	1314	<b>145,85</b>
3	C235	<b>ТБ 299x13</b>	0,0917	1314	<b>120,49</b>

Таблиця 2 Вага нижнього поясу  
(Труби сталеві електрозварні за ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів в поясу, м	Вага, т
1	C235	<b>ТБ 273x6,5</b>	0,0427	1314	<b>56,11</b>
2	C235	<b>ТБ 245x20</b>	0,111	1314	<b>145,85</b>
3	C235	<b>ТБ 273x9,5</b>	0,0617	1167	<b>72,00</b>

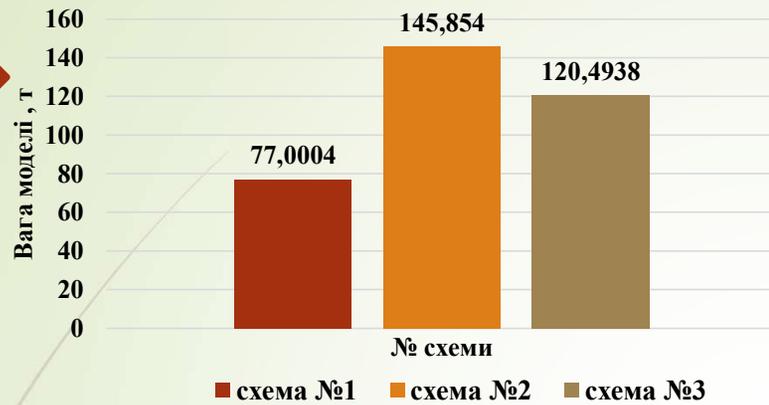
Таблиця 3 Вага нижнього решітки  
(Труби сталеві електрозварні за ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ 219x8	0,0416	4277,19	177,93
2	C235	ТБ 245x7,5	0,0439	3005,27	131,93
3	C235	ТБ 245x15	0,0851	2716,06	231,14

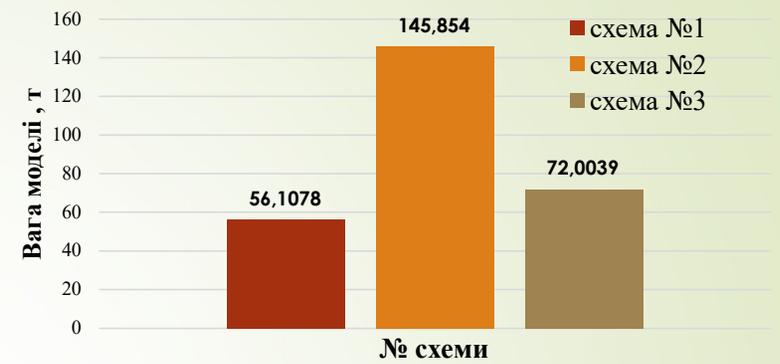
Таблиця 4 Вага колон  
(Труби сталеві електрозварні за ДСТУ 8943:2019)

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина, м	Кількість колон в моделі, шт	Загальна вага колон в моделі, т
1	C235	ТБ 720x10	0,18	7,8	8	10,93
2	C235	ТБ 820x9,5	0,19	7,8	8	11,85
3	C235	ТБ 820x9,5	0,19	7,8	8	11,85

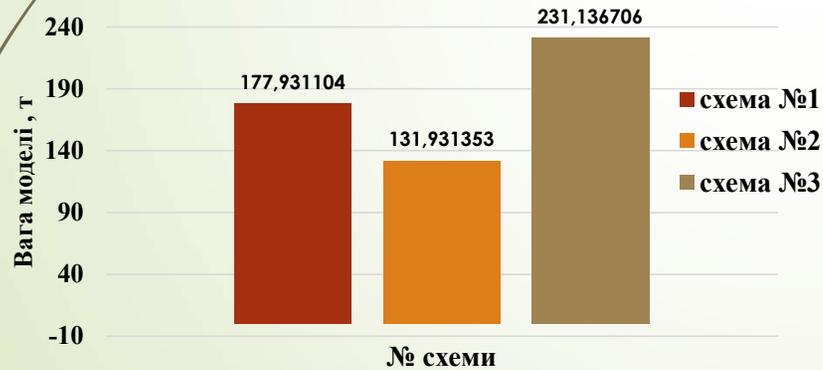
Вага стержнів верхнього поясу



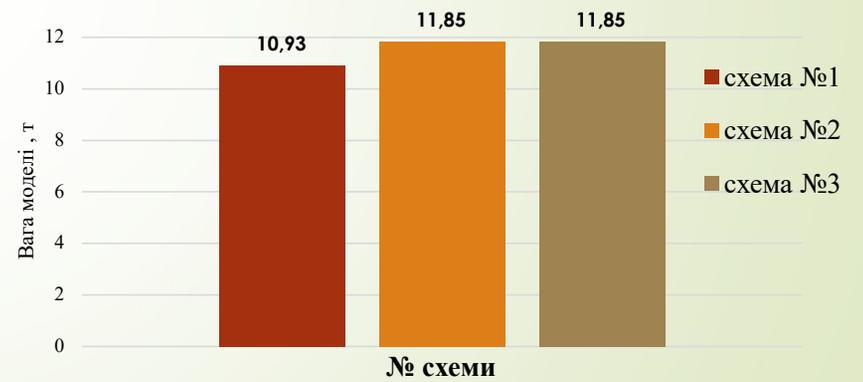
Вага стержнів нижнього поясу



Вага стержнів решітки



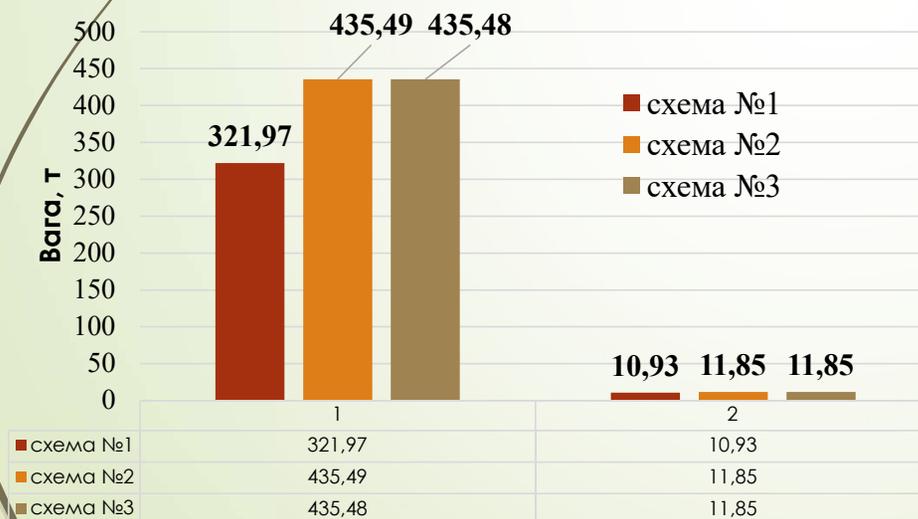
Вага колон



Таблиця Вага моделей конструкції плити

№ схем и	Верхній пояс	Нижній пояс	Розкос и	Вага структурної плити	Колони	Всього вага, т	% структурної плити в загальній вазі моделі
1	77,0004	56,1078	177,93	311,04	10,93	<b>321,97</b>	3,51
2	145,854	145,854	131,93	423,64	11,85	<b>435,49</b>	2,8
3	120,4938	72,0039	231,14	423,63	11,85	<b>435,48</b>	2,8

Загальна вага моделі та вага колон в складі моделі



**Схема №1 є найлегшою:** її пояси та розкоси мають найменшу вагу, тому вся модель важить близько 322 т. Схеми №2 та №3 значно масивніші (≈435 т), але розподіл ваги різний: у схемі №2 основна маса зосереджена в поясах, а у схемі №3 — у розкосах. Легша схема економніша, але потенційно менш жорстка, тоді як масивніші схеми забезпечують кращу стабільність.

## Аналіз впливу форми базового елемента впливає на вагу конструктивних груп елементів

- **Схема №1** (X-подібна) має найефективнішу геометрію: рівномірний розподіл зусиль дозволяє застосовувати легкі пояси й розкоси, тому плита тут найменшої ваги.  
**Схема №2** (конусоподібна) концентрує зусилля у вузлах, через що потребує масивних поясів, що значно збільшує її вагу.  
**Схема №3** (об'ємно-просторова) має багато діагоналей, тому найбільше “важать” саме розкоси, хоча пояси — середньої маси.
- Отже, форма базового елемента визначає, де зосереджується матеріал: у схемі №1 — мінімальна маса й висока економічність, у схемі №2 — перевантажені пояси, у схемі №3 — важкі просторові розкоси. Це і пояснює різницю у загальній вазі та деформативності моделей.

## ВИСНОВКИ

- 1) Мету дослідження досягнуто: виконано аналіз НДС, конструктивний розрахунок і оптимізацію перерізів трьох моделей плит.
- 2) Форма базового елемента суттєво впливає на зусилля, деформації та матеріалоємність конструкції.
- 3) Найбільша напруженість — у схемі №2; схема №3 має високі зусилля в розкосах; схема №1 працює в найсприятливіших умовах.
- 4) Колони в усіх моделях перевантажені; найбільші осьові зусилля в схемі №2, найбільші моменти — в схемі №3.
- 5) Жорсткість: найжорсткіша — схема №1; найбільш деформативна — №2; схема №3 займає проміжне місце.
- 6) Усі схеми мають високий запас стійкості; схема №3 — найстійкіша.



**7)** Основне навантаження несуть пояси; решітка має запас міцності; колони потребують посилення.

**8)** Найменшу масу має схема №1; у схемі №2 матеріал концентрується в поясах, у схемі №3 — у розкосах.

**9)** Схема №1 — найекономніша та найжорсткіша; схема №2 — найбільш напружена й гнучка; схема №3 — компроміс.

**10)** Результати доводять важливість вибору форми базового елемента для забезпечення жорсткості, економічності та надійності конструкції.